

**Rechnerunterstützte Auslegung von reversiblen Füge-
techniken für quasi-generativ hergestellte Funktionsprototypen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Jens Standke
aus
Mettmann

Referent: Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dieter Wissussek

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 17.09.2008

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionstechnologie und Produktentwicklung an der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers für die Betreuung und die fachliche Unterstützung meiner Arbeit. Für die Übernahme des Korreferates und die Unterstützung bei der Fertigstellung der Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Wissussek (Lehrstuhl für Konstruktionstechnik und Kolbenmaschinen, Universität Duisburg-Essen).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Lehrstuhl für Produktionstechnologie und Produktentwicklung eine Reihe von Prototypen gefertigt. Für die uneingeschränkte Unterstützung bei der Fertigung dieser Prototypen und für die damit im Zusammenhang stehenden fachlichen Diskussionen gilt Herrn Reinhard Giese mein besonderer Dank.

Ferner möchte ich mich bei den Herren Dr.-Ing. Markus Hastrich, Dipl.-Ing. Jörg Lubnau, Dipl.-Ing. Timon Malleprey und Klaus-Dieter Werner für die jederzeitige Unterstützung und stetige Diskussionsbereitschaft während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am obigen Lehrstuhl bedanken.

Für die Korrekturen meines Manuskriptes bedanke ich mich bei den Herren Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Stracke und PD Dr.-Ing. Frank Lobeck (Lehrstuhl für Ingenieurinformatik, Universität Duisburg-Essen).

Die wichtigste Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit dieser Dissertation habe ich aus dem Kreis meiner Familie erfahren. Meinen Eltern, die mich stets unterstützt und an mich geglaubt haben, gebührt großer Dank. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Für meine Eltern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Milled Layer Joining	11
2.2	Schicht erzeugen	13
2.2.1	Virtuelle Bauteilzerlegung.....	14
2.2.2	Erzeugung der inneren Hilfsgeometrie	18
2.2.3	Erzeugung des Rohmaterials	20
2.3	Kontur erzeugen.....	21
2.3.1	NC-Code-Generierung	21
2.3.2	Zweiseitige Bauteilbearbeitung.....	22
2.4	Schichten fügen	28
2.4.1	Bauteilschichten positionieren	28
2.4.2	Bauteilschichten fügen	30
2.5	Fazit	32
3	Anforderungen an eine reversible Fügetechnik für Funktionsprototypen... 33	
3.1	Mechanische Bestimmtheit	33
3.2	Nutzung als Spanntechnik.....	34
3.3	Fertigungskontrolle.....	35
3.4	Reversibilität.....	36
3.5	Anwendungsbereich.....	36
4	Anforderungen an eine rechnerunterstützte Auslegung	38
4.1	Funktionalität.....	38
4.1.1	Eingabe.....	38
4.1.2	Verarbeitung.....	39
4.1.3	Ausgabe	40
4.2	Benutzerfreundlichkeit.....	40
4.3	Wartbarkeit.....	41
5	Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von reversiblen Fügetechniken für Funktionsprototypen	43
5.1	Architektur des Gesamtkonzeptes	43
5.2	Reversible Fügetechniken für Funktionsprototypen	45
5.2.1	Bohrung-Zapfen-Kombination.....	52

5.2.1.1	Fügetechnik	52
5.2.1.2	Festigkeitsbetrachtung	55
5.2.1.3	Vorrichtung	61
5.2.2	Prismen-Verzahnung	67
5.2.2.1	Fügetechnik	67
5.2.2.2	Festigkeitsbetrachtung	73
5.2.2.3	Vorrichtung	86
5.3	Programm-Modul zur rechnerunterstützten Auslegung	91
5.3.1	Leistungsumfang	91
5.3.2	Allgemeiner Aufbau	102
5.3.3	Umsetzung und Integration in ein CAD-System	104
6	Exemplarische Verifikation	124
6.1	Beispiel 1: Komplexer Probekörper mit Bohrung-Zapfen-Kombination	125
6.1.1	Datentechnische Ausführung	126
6.1.2	Fertigungstechnische Ausführung	130
6.2	Beispiel 2: Komplexer Probekörper mit Prismen-Verzahnung	135
6.2.1	Datentechnische Ausführung	135
6.2.2	Fertigungstechnische Ausführung	147
6.3	Beispiel 3: Kurbelwellengeometrie mit Prismen-Verzahnung	152
6.3.1	Datentechnische Ausführung	152
6.3.2	Fertigungstechnische Ausführung	158
6.4	Genauigkeitsanalyse der Prismen-Verzahnung	164
7	Zusammenfassung	167
8	Ausblick	169
9	Literaturverzeichnis	171

Lebenslauf

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich eine Vielzahl von generativen¹ **Rapid Prototyping** Verfahren (RP-Verfahren) auf dem Markt etabliert. Der wesentliche Nachteil dieser Verfahren liegt in der eingeschränkten Werkstoffauswahl. Dies ist damit zu begründen, dass in der Regel nur Werkstoffe verwendet werden können, welche speziell auf das jeweilige RP-Verfahren abgestimmt sind [1]. Dieser Sachverhalt ist insbesondere für die Prototypen von Bedeutung, welche zur Überprüfung von Funktionen oder seriennah eingesetzt werden und deshalb besondere Ansprüche an die eingesetzten Werkstoffe stellen.

Eine Lösung des Problems liegt in der Nutzung der „konventionellen“ CNC-Frästechnologie, welche mittlerweile in der Literatur als RP-Verfahren verstanden wird [2]. Die Werkstoffauswahl umfasst alle spanbaren Materialien, womit dem Benutzer eine große Werkstoffvielfalt für die Fertigung von Prototypen zur Verfügung steht. Dadurch ist die Herstellung von Prototypen bereits im später zum Einsatz kommenden Serienwerkstoff möglich, so dass diese als Funktionsprototyp genutzt und Tests unterzogen werden können. Da ein Großteil der Produktion mittels konventioneller Fertigungsverfahren wie beispielsweise der CNC-Frästechnologie erfolgt [3], eröffnet dies vor allem klein- und mittelständischen Unternehmen die Möglichkeit zur eigenen Prototypenfertigung, da diese Unternehmen häufig nicht über die finanziellen Mittel zum Einsatz spezieller RP-Verfahren verfügen.

Neben der großen nutzbaren Werkstoffvielfalt ermöglicht das Fräsen gegenüber den generativen RP-Verfahren die Herstellung von hochgenauen Prototypen bezüglich der Maß-, Form- und Oberflächengenauigkeit [1] [4]. Der Nachteil des Fräsens liegt jedoch in der eingeschränkten Fertigung von Geometrien. So können beispielsweise Prototypen, welche Hinterschnidungen in ihrer Geometrie aufweisen, frästechnisch nicht oder nur sehr aufwendig hergestellt werden. Zur Lösung dieses Problems wird ein spezielles Verfahrensprinzip angewendet, bei dem der herzustellende Prototyp zunächst schichtweise gefräst wird, um dann anschließend diese Schichten wieder zusammenzufügen [5]. Dadurch entsteht zum einen ein zusätzlicher Prozessschritt, zum anderen liegt die Schwierigkeit in der Auswahl einer geeigneten Fügetechnik. In Anlehnung an die generativen RP-Verfahren wird diese Art der Herstellung als quasi-generativ bezeichnet [4].

¹ generativ: Fertigung von Prototypen durch Materialaufbau

Nach *Assmann* [4] lässt sich die Prototypenherstellung mit den gegenwärtigen RP-Verfahren anhand einer Funktionsanalyse grundsätzlich in drei Funktionen unterteilen (vgl. **Abbildung 1-1**). Dabei kann die Durchführung in unterschiedlicher chronologischer Reihenfolge, als auch in einem simultanen Ablauf einzelner Schritte erfolgen. Die Anzahl der Fertigungsschritte kann als Maß für die Generativität der RP-Verfahren herangezogen werden [4]. Werden alle Fertigungsschritte simultan und mit der gleichen Fertigungstechnologie durchgeführt, so liegt ein generatives RP-Verfahren vor, wie z.B. die Stereolithographie.

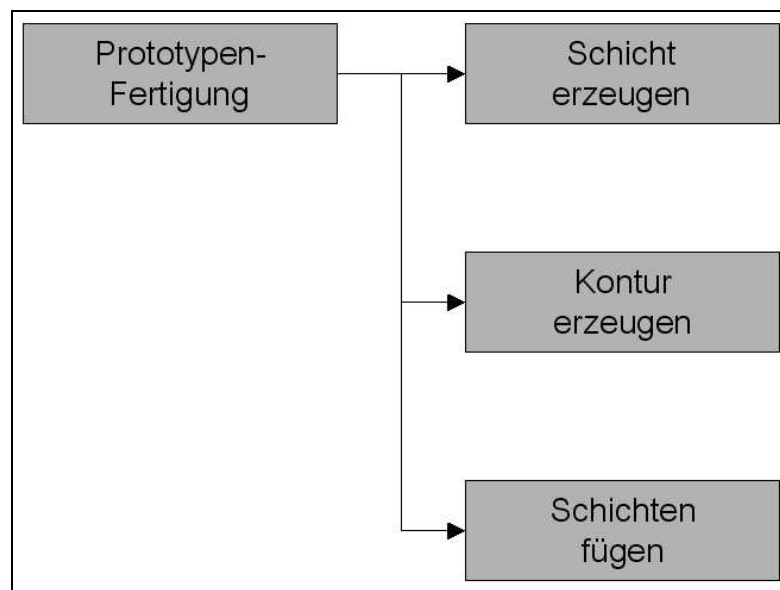


Abbildung 1-1: Funktionsanalyse der Prototypen-Fertigung [4]

Werden dagegen zwei oder drei Fertigungsschritte getrennt nacheinander durchgeführt, so liegt ein zwei- bzw. dreischrittiges Fertigungsverfahren vor. Als Beispiel für ein zweischrittiges Verfahren ist das **Controlled Metal Build-Up (CMB)** und für ein dreischrittiges Verfahren das **Layer Object Manufacturing (LOM)** zu nennen (vgl. **Abbildung 1-2**). Da aufgrund des hohen Automatisierungsgrades dieser Verfahren oft keine Eingriffe seitens des Benutzers notwendig und im Ergebnis keine Unterschiede zu den einschrittigen Verfahren erkennbar sind, werden diese als quasi-generativ bezeichnet [4].

Bei allen dreischrittigen Fertigungsverfahren ist die Funktion „Schichten fügen“ von allen anderen Funktionen entkoppelt und stellt daher einen eigenständigen Fertigungsschritt dar. Das führt dazu, dass die Wahl einer geeigneten Fügetechnik großen Einfluss auf die Funktionseigenschaften quasi-generativ hergestellter Prototypen hat und diesem Prozessschritt daher ein hoher Stellenwert zuteil wird.

RP-Verfahren	1-Schritt-Verfahren	2-Schritt-Verfahren	3-Schritt-Verfahren	Art	Materialien
Stereolithographie (STL)	x			generativ	Epoxid- und Acrylharze
Solid Ground Curing (SGC)	x				Photopolymere
Selektives Lasersintern (SLS)	x				Kunststoffe (PA), Metalle, Sande, Keramiken
3D-Printing	x				Kunststoffe, Metalle, Keramiken
Fused Deposition Modelling (FDM)	x				Kunststoffe (ABS), Thermoplaste
Multi Jet Modelling (MJM)	x				Kunststoffe (ABS), Thermoplaste
Control Metal Build-Up (CMB)		x		quasi generativ	Spanbare Metalle
Layer Object Manufacturing (LOM)			x		Papier, Kunststoffe (Folien)
Fräsen			x		Alle spanbaren Materialien

Abbildung 1-2: Klassifizierung der RP-Verfahren nach der Anzahl an Prozessschritten [2]

Zwar bietet die Literatur eine Fülle von Füge-Techniken zum Verbinden von Bauteilen, jedoch ist deren Auswahl neben den Anforderungen an den Prototyp auch an deren Werkstoffe gekoppelt. Das führt dazu, dass bei großer Werkstoffvielfalt auch die Anzahl an möglichen Füge-Techniken zunimmt und dass der Benutzer eine Vielzahl von unterschiedlichen Fügeverfahren kennen und beherrschen muss. Neben den fachlichen Kenntnissen sind zudem in Abhängigkeit von der Füge-Technik zusätzliche Gerätschaften erforderlich, welche einen erheblichen Investitionsaufwand darstellen.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieser Problematik besteht darin, weitgehend werkstoffunabhängige Füge-Techniken zu verwenden, welche speziell auf die Bedürfnisse der Prototypenfertigung mittels Fräsen abgestimmt sind. In Betracht kommen dafür kraft- und formschlüssige Füge-Techniken. Diese üben jedoch meist einen Einfluss auf die Geometrie der zu fügenden Bauteile aus. Dieser Umstand wird gerade im Hinblick auf eine mögliche Kombination einer form- und kraftschlüssigen Verbindung deutlich. Das hat zur Folge, dass vor Beginn der Fertigung des Prototyps bzw. dessen Schichten eine datentechnische Integration der Füge-Technik zu den Bauteilschichten erfolgen muss.

Ein erster Ansatz für eine solche Füge-Technik ist die Verwendung einer Bohrung-Zapfen-Kombination, welche als Pressverband ausgelegt wird [4]. Neben der Verwendung als

Fügetechnik wird diese zudem als Spanntechnik während der frästechnischen Herstellung der Schichten verwendet. Eine Analyse der Bohrung-Zapfen-Kombinationen ergab, dass das Grundprinzip zur Nutzung als Füge- und Spanntechnik großes Potenzial besitzt, jedoch bereitet die Anwendung in der Praxis aufgrund von unvermeidbaren Fertigungstoleranzen einige Schwierigkeiten. Zudem sind Pressverbände bei entsprechender Auslegung als irreversibel einzustufen, was ein Austauschen der Schichten zur Modifizierung der Prototypen nicht erlaubt.

Darauf aufbauend wurde in einer weiterführenden wissenschaftlichen Arbeit [3] der Grad der Automatisierung durch eine automatische Schichtgenerierung sowie durch eine automatische datentechnische Integration der Bohrung-Zapfen-Kombinationen zu den Bauteilschichten gesteigert. In diesem Zusammenhang fehlt jedoch eine rechnerunterstützte Auslegung der Füge- und Spanntechnik.

In den vorhandenen Arbeiten wird bisher nur die Nutzung der Frästechnologie zum Erstellen von Prototypen genutzt. Wünschenswert ist jedoch auch die Verwendung der Drehtechnologie, da in der Praxis Prototypen auftreten, welche in die Bereiche Fräs- und Drehbearbeitung unterteilt werden müssen. Zur Lösung dieses Problems und der vorher angesprochenen Probleme soll nun ein umfassendes Fügekonzept zur Herstellung von Prototypen mittels Fräsen und Drehen entwickelt werden, welches darüber hinaus auch eine rechnerunterstützte Auslegung der Füge- und Spanntechnik beinhaltet.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst in Kapitel 2 auf den Stand der Technik im Bereich der Prototypenherstellung mittels Fräsen und insbesondere auf das Fertigungskonzept von *Assmann* [4] eingegangen. Dabei richtet sich der Focus vor allem auf die fehlende rechnerunterstützte Auslegung der Fügetechnik sowie auf die Problematik des Fügens quasi-generativ hergestellter Prototypen selbst. Aufbauend darauf, werden in Kapitel 3 die Anforderungen an eine Fügetechnik und in Kapitel 4 die Anforderungen an eine rechnerunterstützte Auslegung formuliert. Die genannten Anforderungen bilden in Kapitel 5 die Eingangsgröße für die Erstellung eines Gesamtkonzeptes. Dieses beinhaltet ein speziell auf die Prototypenherstellung mittels Fräsen abgestimmtes Fügekonzept, welches die Integration der Drehtechnologie ermöglicht, und enthält gleichzeitig ein Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von Fügetechniken. Nach der Beschreibung des Gesamtkonzeptes, wird in Kapitel 6 eine Verifizierung anhand konkreter Beispiele durchgeführt.

2 Stand der Technik

Dem Vorteil der großen Materialvielfalt bei der Herstellung von Prototypen mittels Fräsen stehen Einschränkungen bei der Fertigung komplexer Geometrien gegenüber. Einschränkungen sind z.B. Hinterschneidungen am Prototyp, die eine Fertigung mittels Fräsen verhindern. Dieser Umstand führte zu der Entwicklung erster softwarebasierter Verfahren, welche eine Fertigung schichtweise aufgebauter Prototypen mit komplexen Geometrien ermöglichen. Die dazu derzeit auf dem Markt erhältlichen kommerziellen Softwareprodukte sind:

- *Stratoconception* (CIRTES/CHARLYROBOT) und
- *Millit* (COSCOM) [4].

Beide Programme arbeiten nach dem Prinzip der so genannten Schichtfrästechnologie [1], bei dem der Prototyp datentechnisch in einzelne Schichten zerlegt wird und diese mittels einer konventionellen 3-Achs-CNC-Fräsmaschine hergestellt werden. Mit dieser Verfahrensweise lassen sich viele fertigungstechnische Probleme lösen, wie z.B. die frästechnische Herstellung von Geometrien mit Hinterschneidungen. Dieser Ansatz führt jedoch zu der bereits in Kapitel 1 angesprochenen Problematik, dass die Schichten im Anschluss an die Fertigung wieder gefügt werden müssen. Als Werkstoff können grundsätzlich alle fräsbaren Materialien verwendet werden. Die Auswahl kann jedoch durch die Antriebsleistung der zur Verfügung stehenden Fräsmaschine begrenzt werden [1]. Das Material wird für den Herstellungsprozess in Form von Platten bereitgestellt. Damit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Plattendicke und der Anzahl an Schichten.

Zur Verdeutlichung der Schichtfrästechnologie werden im Folgenden die Software Produkte *Stratoconception* und *Millit* erläutert. Die **Abbildung 2-1** zeigt das Verfahrensprinzip der Software *Stratoconception*. Diese Software arbeitet grundsätzlich maschinenunabhängig, wird jedoch meistens in Verbindung mit einer Fräsmaschine der Firma *Charlyrobot* angeboten [4]. Im ersten Schritt werden vom Benutzer Angaben zur Orientierung des herzustellenden Prototypen getroffen und damit die Lage der parallelen Schichten festgelegt. Zudem ist vom Benutzer die maximale Schichtdicke anzugeben, welche für die geometrische Qualität des Prototyps sowie für das Maß der Plattenstärke verantwortlich ist [4].

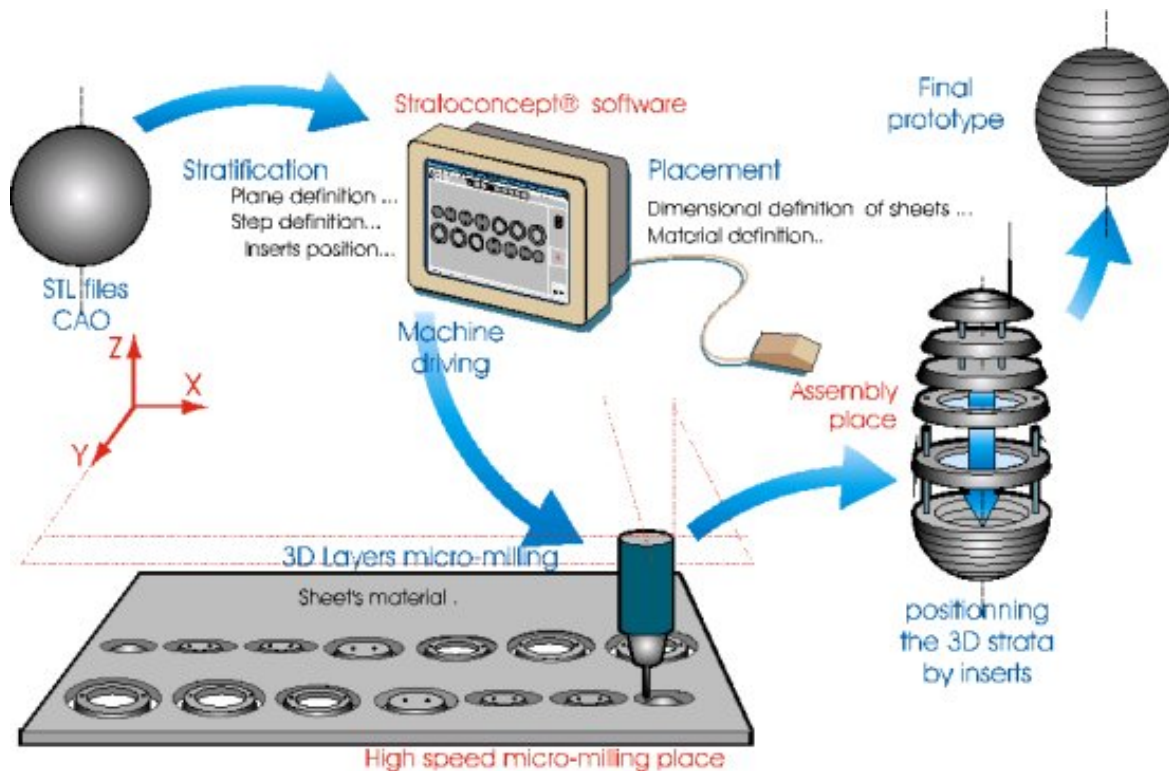


Abbildung 2-1: Verfahrensprinzip Stratoconception [4]

Anschließend wird der in digitaler Form vorliegende Prototyp automatisch in einzelne Schichten zerlegt und diese verschnittoptimiert auf den Platten angeordnet. Die Anzahl der erforderlichen Platten wird ebenfalls von der Software ermittelt.

Für die Fertigung werden die erzeugten Daten an die Steuerung der Fräsmaschine übermittelt. Die Schichten werden zusätzlich mit Bohrungen versehen, über die der Prototyp später mit Führungsstangen montiert und positioniert werden kann. Hinterschneidungen werden von der Software erkannt und die betreffenden Schichten für den Fräsvorgang gedreht auf der Platte angeordnet. Schichten mit zwei gegenläufigen Hinterschneidungen können nicht gefertigt werden oder müssen auf mehrere kleinere Schichten verteilt werden [1].

Dies hat zur Folge, dass die Geometrie der unbearbeiteten Seite durch die Plattendicke der einzelnen Schichten angenähert wird (vgl. **Abbildung 2-2**). Dadurch entsteht ein Prototyp mit einem ausgeprägten Treppenstufeneffekt. Der Effekt lässt sich mit steigender Anzahl an Platten mit geringer Dicke minimieren. Im Gegenzug dazu steigt jedoch der Bedarf an Material sowie der Aufwand zum Fügen der Schichten [4].

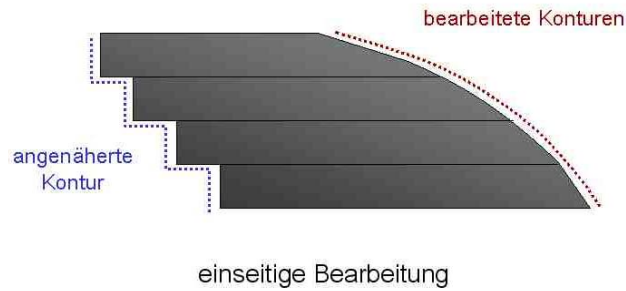


Abbildung 2-2: Treppenstufeneffekt bei einseitiger Bearbeitung [4]

Ein weiterer Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass für die Herstellung nur Stirnfräser verwendet werden können. Dies führt insbesondere bei gekrümmten Flächen ebenfalls zu einem Treppenstufeneffekt. Weiterhin kann dies in Abhängigkeit vom gewählten Werkstoff zu einem „Ausfransen“ der Kanten führen, was nach der Fertigung manuell beseitigt werden muss. Dies ist mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Hinzu kommt, dass das manuelle Nachbearbeiten der Oberfläche (Finishing) einen negativen Einfluss auf die Geometrie und die Oberflächenqualität ausübt [4].

Die Platten werden für die Bearbeitung mittels doppelseitigen Klebebands auf dem Maschinentisch fixiert. Um ein Ablösen der Platten sowie der Schichten durch die auftretenden Bearbeitungskräfte zu vermeiden, ist eine Anpassung der Schnittwerte erforderlich. Das Entfernen der Schichten ist mit einem hohen Kraftaufwand verbunden, was mitunter zu einer Zerstörung einzelner Schichten führen kann. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, mittels einer Vakuumspanntechnik die Platte auf dem Maschinentisch zu fixieren. Für eine ausreichend große Spannwirkung müssen die Schichten jedoch einen Mindestdurchmesser aufweisen [4]. Je nach den verwendeten Materialien werden einzelne Schichten mittels kleiner Stege (äußere Hilfsgeometrien) mit der Platte verbunden. Diese dienen der besseren Fixierung und es kann mit höheren Zerspankräften gearbeitet werden. Die Stege werden zusammen mit der Schicht aus der Platte herausgearbeitet.

Nach der Herstellung müssen die Schichten jedoch aus der Platte herausgelöst werden, was mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden ist [1]. Hinzu kommt, dass die Stege mit der Schichtgeometrie eine Einheit bilden, so dass ein manuelles Entfernen zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen in der Bauteilgeometrie und in der Oberflächenqualität führt. Dieser Umstand wird gerade im Hinblick auf das Entfernen von Stegen an Freiformflächen deutlich [4].

Zum Fügen der Schichten werden diese über die Bohrungen mittels der Führungsstangen positioniert, verklebt und verpresst [1]. Die Verwendung eines Klebstoffes zum Fügen der Schichten zieht automatisch Nachteile in der mechanischen Belastbarkeit mit sich. Klebstoffe gelten allgemein für die Aufnahme von Biege- und Schälkräften als weniger geeignet [6]. Gerade im Hinblick auf die Erstellung von Funktionsprototypen kann dies zu Problemen führen, da diese mitunter hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Hinzu kommt, dass der zusätzliche Klebstoff zwischen den Schichten einen prinzipiellen Fehler in der Gesamthöhe des Bauteils verursacht.

Das System von *Millit* arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie das System *Stratoconception*. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass *Millit* die Möglichkeit einer zweiseitigen Schichtbearbeitung anbietet. Damit sind gegenläufige Hinterschneidungen herstellbar und der Treppenstufeneffekt entfällt (vgl. **Abbildung 2-3**).

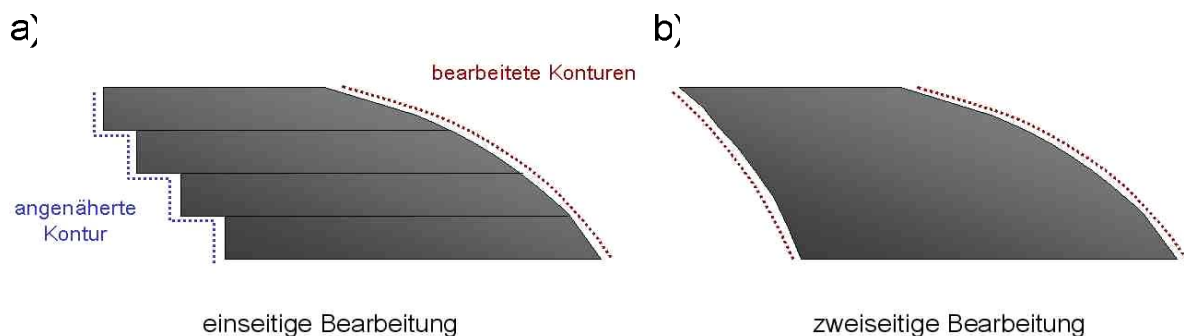


Abbildung 2-3: a) *Stratoconception*, b) *Millit* [4]

Der Umgang mit dem Softwareprogramm *Millit* gestaltet sich ähnlich wie mit *Stratoconception*. So müssen ebenfalls die Orientierung sowie die maximale Schichtdicke angegeben werden. Zudem besteht auch hier die Möglichkeit, Bohrungen für das spätere Montieren und Positionieren der Schichten zu setzen. Im Anschluss daran erfolgt analog zu *Stratoconception* das Zerlegen des Prototyps in einzelne Schichten, sowie die verschnittoptimierte Anordnung auf den Platten. *Millit* erkennt ebenfalls Hinterschneidungen und führt in diesem Bereich eine Zerlegung der Geometrie durch zur Eliminierung der Hinterschneidung.

Im Gegensatz zu dem System von *Stratoconception* werden die Schichten grundsätzlich mit äußeren Hilfsgeometrien an den Platten fixiert. Das führt zu einem relativ hohen Zerspanvolumen, da diese zusammen mit den Schichten aus der Platte herausgearbeitet werden müssen. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass sich die Späne in der Rahmenstruktur ansammeln. Das führt einerseits

zu einer eingeschränkten Wärmeabfuhr, welches sich negativ auf die Standzeit des Werkzeugs auswirkt und führt andererseits zu unkontrollierten Schleifwirkungen der nicht abgeführten Späne an der Bauteiloberfläche, was Ungenauigkeiten an der Schichtgeometrie hervorrufen kann [4].

Für den zweiten Fertigungsschritt zur Bearbeitung der Unterseite der Platte muss diese um 180° gedreht werden. Dieser Vorgang verlangt eine präzise und reproduzierbare Spanntechnik [4]. Dazu wird zum einen die Platte von *Millit* automatisch mit zwei Bohrungen versehen, welche eine gedachte Rotationsachse für die 180° -Drehung darstellt und zum anderen muss der Maschinentisch mit speziell auf die Bohrungen abgestimmten Spannstiften versehen werden (vgl. **Abbildung 2-4**). Zur Aufnahme unterschiedlich großer Platten ist der zweite Spannstift entlang der x-Achse verschiebbar. Der erste Spannstift ist dagegen in seiner Position unveränderlich und stellt einen Bezugspunkt für die Fräsbearbeitung dar.

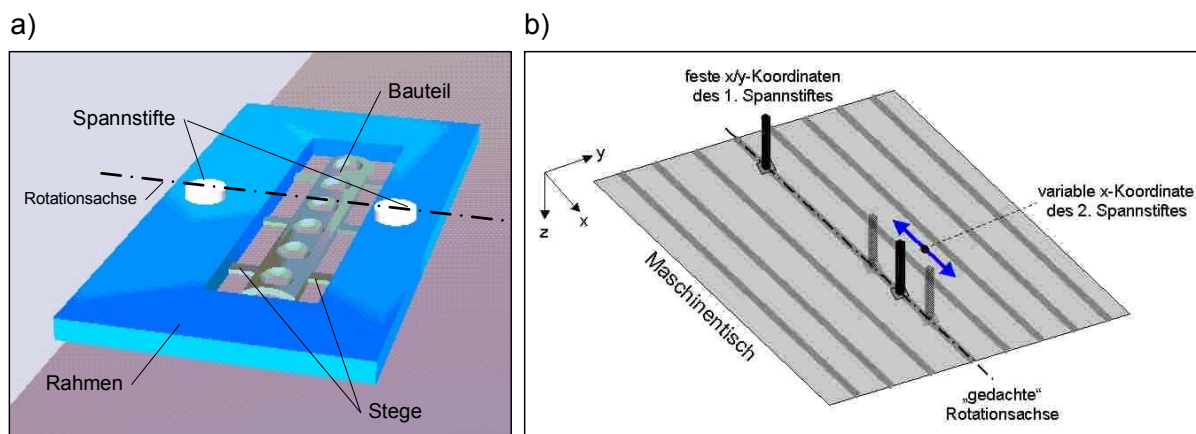


Abbildung 2-4: a) Bauteil in Rahmenstruktur b) Maschinentisch mit Spannstiften [4]

Das Herauslösen der Schichten aus der Rahmenstruktur ist mit den gleichen Problemen verbunden wie bei dem Konzept von *Stratoconception*. *Millit* bietet hingegen eine Reihe von Frässtrategien sowie die Nutzung verschiedener Fräserarten an, wodurch grundsätzlich bessere Oberflächenqualitäten erreichbar sind. Darauf aufbauend wurde von *Assmann* [4] ein neues Konzept für die Prototypenfertigung mittels Fräsen entwickelt, welches ebenfalls auf der Schichtfrästechnologie basiert. Es unterscheidet sich im Wesentlichen durch zwei Eigenschaften:

1. innere statt äußere Hilfsgeometrien
2. innere Hilfsgeometrie ist zugleich Füge- als auch Spanntechnik

Die äußere Hilfsgeometrie (Stege) wurde nach innen auf die Schnittfläche der Schichten verlegt. Dadurch entfällt zum einen ein aufwendiges manuelles Nacharbeiten (Finishing) der Schichtgeometrie und zum anderen wird der Materialverbrauch deutlich gesenkt. Neben der Nutzung der inneren Hilfsgeometrie als Spanntechnik zum Fixieren der Bauteilschicht während der Fräsbearbeitung wird diese zudem als Fügetechnik zum Verbinden der Schichten genutzt. Diese Vorgehensweise erfordert eine Auslegung der inneren Hilfsgeometrie sowohl anhand der auftretenden Zerspan- als auch der auftretenden Betriebskräfte.

In einer weiterführenden Arbeit von Lobeck [3] wurde ein Konzept entwickelt und realisiert zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen unter besonderer Beachtung der Integration von Rapid Prototyping. Als RP-Verfahren wurde Fräsen und das Fertigungskonzept von *Assmann* gewählt. Im Zuge dessen wurden Ansätze des Konzeptes automatisiert, wie z.B. das manuelle Hinzufügen der inneren Hilfsgeometrie zur Schicht, automatisiert.

Im Folgenden wird auf den Stand der Technik der Prototypenherstellung mittels Fräsen nach dem Fertigungskonzept von *Assmann* [4] eingegangen. Dabei findet der Lösungsansatz von Lobeck Berücksichtigung und wird an entsprechenden Stellen erwähnt. Grundlage der Ausführungen bilden die aus Kapitel 1 der Funktionsanalyse notwendigen drei Funktionen zur Herstellung von Prototypen. Zum Ende der Ausführungen werden die Defizite zum Stand der Technik zusammenfassend dargestellt. Da in der Literatur keine einheitliche Begriffsdefinition für die Nutzung der Frästechnologie als quasi-generatives RP-Verfahren zu finden ist, wird es im weiteren Verlauf der Arbeit als **Milled-Layer-Joining-Verfahren** (MLJ-Verfahren) bezeichnet. Die Namensgebung ist damit zu begründen, dass das Verfahren im Wesentlichen gekennzeichnet ist durch das Fräsen einzelner Schichten sowie einem anschließenden Fügen dieser Schichten.

2.1 Milled Layer Joining

Die **Abbildung 2-5** veranschaulicht am Beispiel einer massiven Kugel das prinzipielle Fertigungskonzept der Prototypenherstellung nach *Assmann* [4] aus datentechnischer und fertigungstechnischer Sicht.

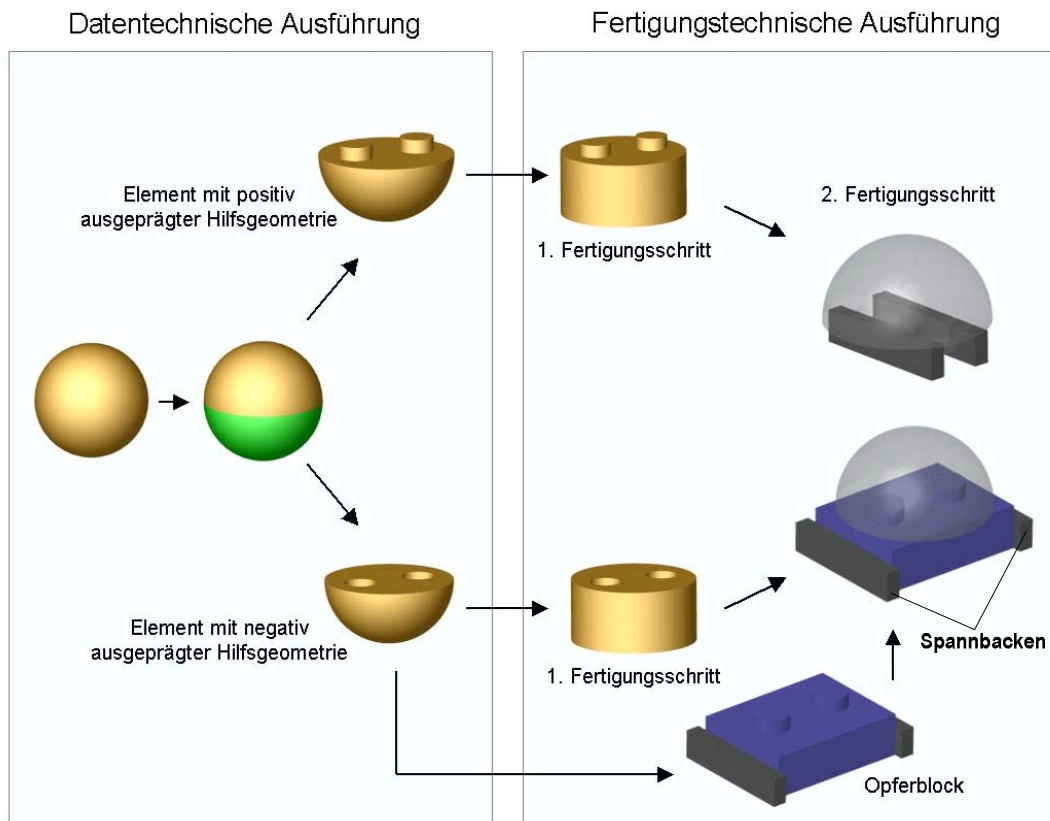


Abbildung 2-5: Fertigungskonzept am Beispiel einer Kugel [4]

Die datentechnische Ausführung beinhaltet die frästechnische Aufbereitung des CAD-Datensatzes und die fertigungstechnische Ausführung enthält die Herstellung des Prototyps mittels einer konventionellen 3-Achs-CNC-Fräsmaschine. Für die frästechnische Herstellung der Kugel ist es notwendig, diese aus mindestens zwei Richtungen zu bearbeiten. Da ein Fräser aus einer Bearbeitungsrichtung nicht jeden Punkt der Kugelgeometrie erreichen kann, muss die Lage der Kugel in der Fräsmaschine gegenüber dem Fräser jeweils durch Umspannvorgänge verändert werden. Ein Spannvorgang auf einer Kugelfläche ist mittels konventioneller Spannmittel, wie z. B. den Spannbacken eines Maschinenschraubstocks, als sehr problematisch anzusehen.

Zur Lösung des Problems sieht das Konzept nach *Assmann* in der datentechnischen Ausführung das Einfügen einer Trennebene vor. Dazu wird eine Kugel im CAD-System in zwei Hälften

getrennt und um eine positiv bzw. negativ ausgeprägte Hilfsgeometrie in Form von Bohrungen und Zapfen erweitert. Im weiteren Verlauf der Prototypenherstellung werden die Kugelhälften als eigenständige Bauteile angesehen.

Nach Beendigung der datentechnischen Ausführung erfolgt mittels einer NC-Software die Erstellung von Maschinen-Codes zur Steuerung der CNC-Fräsmaschine. Die NC-Software ist die Schnittstelle zwischen der datentechnischen und der nachfolgenden fertigungstechnischen Ausführung. In der fertigungstechnischen Ausführung wird neben dem Erzeugen der eigentlichen Bauteilkontur auch die in der datentechnischen Ausführung zusätzlich eingefügte Hilfsgeometrie herausgearbeitet. Die Aufspannung des Rohmaterials kann dabei über konventionelle Spanntechniken erfolgen, wie z.B. die Verwendung von Standard-Spannbacken.

Nach Beendigung des ersten Fertigungsschrittes folgt abschließend der zweite Fertigungsschritt aus der Richtung der Oberseite. Dazu werden die Kugelhälften mit Hilfe der Hilfsgeometrie aufgespannt und die Kontur der Halbkugel herausgearbeitet. Damit entfällt zum einen das problematische Spannen der Kugelflächen und zum anderen ist durch die Anordnung der Hilfsgeometrie in der Schichtebene ein uneingeschränkter Zugang des Fräasers zur Bauteilschicht gewährleistet. Das Spannen der Kugelhälfte mit Zapfen kann wie in der ersten Aufspannung mittels Spannbacken erfolgen. Für das Spannen der Kugelhälfte mit Bohrungen ist ein so genannter Opferblock notwendig, der über entsprechend angepasste Zapfen verfügt.

Nach der Fertigung müssen die Kugelhälften wieder zu einer Kugel gefügt werden. Der Fügeprozess kann mittels der Hilfsgeometrie, welche zuvor als Spanntechnik genutzt worden ist, erfolgen. Dazu werden die Zapfen und Bohrungen als Pressverband ausgeführt. Sie dienen während des Fügeprozesses auch zum Positionieren der Kugelhälften. Aus der vorausgehend beschriebenen prinzipiellen Funktionsweise der Prototypenherstellung nach *Assmann* ergibt sich in Anlehnung an Kapitel 1 die folgende für das MLJ-Verfahren erweiterte Funktionsanalyse (vgl. **Abbildung 2-6**):

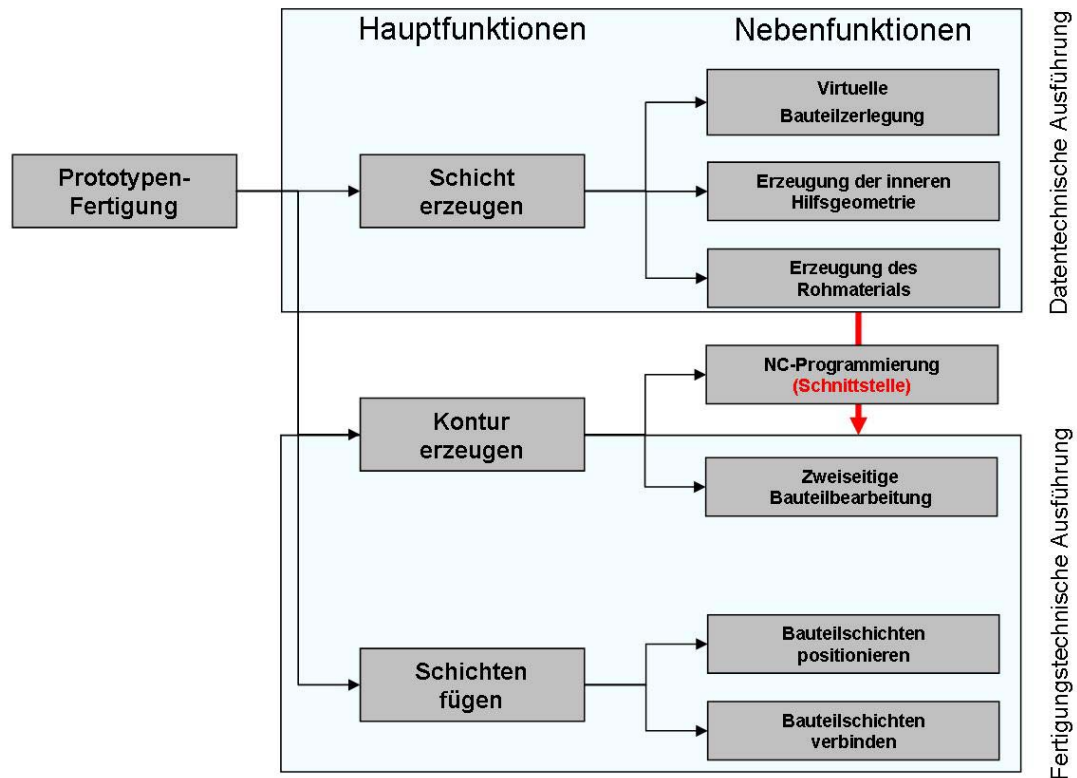


Abbildung 2-6: Haupt- und Nebenfunktionen des MLJ-Verfahren [4]

Die Hauptfunktionen zur Herstellung eines Prototyps sind in die für das MLJ-Verfahren notwendigen Nebenfunktionen unterteilt, welche im weiteren Verlauf der Arbeit ausführlich diskutiert und einer kritischen Analyse unterzogen werden. Zudem findet sich eine Zuordnung der Haupt- bzw. Nebenfunktionen zu der daten- und fertigungstechnischen Ausführung wieder.

2.2 Schicht erzeugen

Bei der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen ist ein vorhandenes 3D-CAD-Modell die Grundvoraussetzung. Die im CAD-System erzeugten Geometriedaten werden im späteren Fertigungsprozess für die Programmierung der NC-Maschine benötigt. Im Vorfeld müssen die Geometriedaten des herzustellenden Prototyps für die Fräsbearbeitung aufbereitet werden. Dazu gehört:

- eine Kollisionsprüfung zwischen Werkzeug und Prototyp, deren Ergebnis die Zerlegung des Prototyps in einzelne Schichten bedeuten kann,
- das Ergänzen dieser Schichten um eine innere Hilfsgeometrie, welche als Spanntechnik während der Fräsbearbeitung und als Fügetechnik zum Verbinden der Schichten dient,
- die Festlegung des Rohmaterials und dessen Abmessungen.

2.2.1 Virtuelle Bauteilzerlegung

Die Herstellung von komplexen Geometrien bedingt oft eine Zerlegung des Prototyps in einzelne Schichten. Ausgehend von der Tatsache, dass bei der frästechnischen Herstellung eines Prototyps jeder Punkt der Kontur mit dem Fräser erreichbar sein muss, ist dies beispielsweise bei Hinterschneidungen meistens nicht möglich. Dies kann damit begründet werden, dass die Zugänglichkeit der Hinterschneidung infolge der Bauteilgeometrie nicht gegeben ist. Bei einer Missachtung der Zugänglichkeit kommt es zu einer Kollision zwischen Werkzeug und Werkstück, mit dem Ergebnis, dass dadurch ein Prototyp frästechnisch nicht hergestellt werden kann.

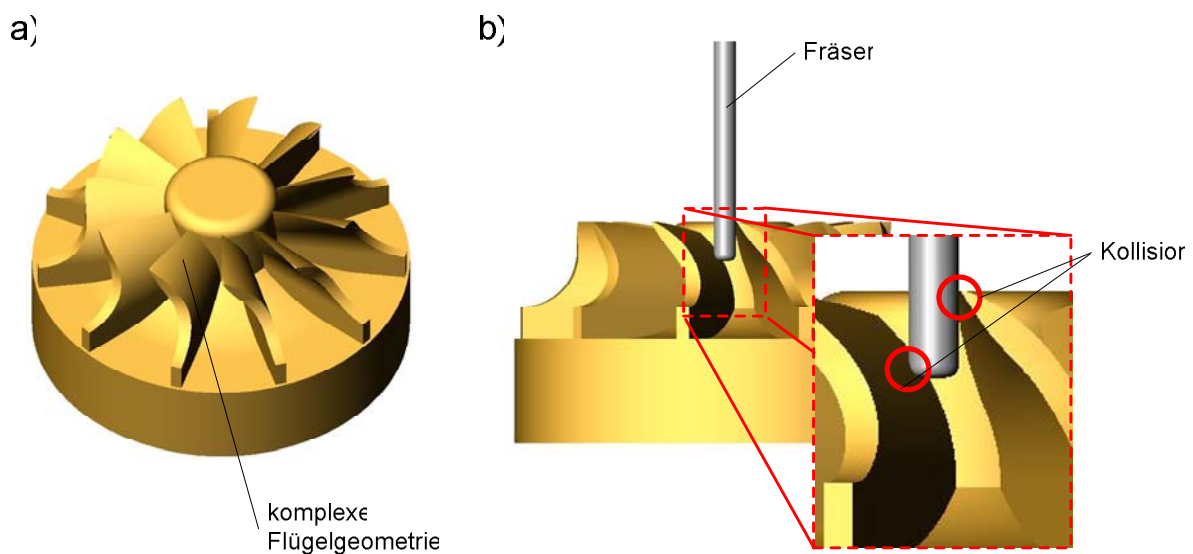


Abbildung 2-7: a) Rotor einer Miniaturturbine b) Fräserkollision bedingt durch Hinterschneidung

Die **Abbildung 2-7** verdeutlicht diese Problematik am Beispiel eines Rotors mit komplexer Flügelgeometrie. Eine frästechnische Herstellung des Prototyps ist nur über eine Aufteilung in mehrere Teilkörper möglich, indem der Prototyp in einem CAD-System einer virtuellen Bauteilzerlegung unterzogen wird. Hierbei wird eine Kollisionsprüfung mit einem fräser-identischen Körper und dem zu analysierenden Prototyp durchgeführt. Die **Abbildung 2-8** veranschaulicht die virtuelle Bauteilzerlegung anhand der komplexen Flügelgeometrie des Rotors. Tritt zwischen dem Werkzeug und der Bauteilgeometrie eine Kollision auf, so ist die maximale Bearbeitungstiefe erreicht und der Prototyp ist in dieser Tiefe in eine Bauteilschicht und in den verbleibenden Prototyp zu unterteilen.

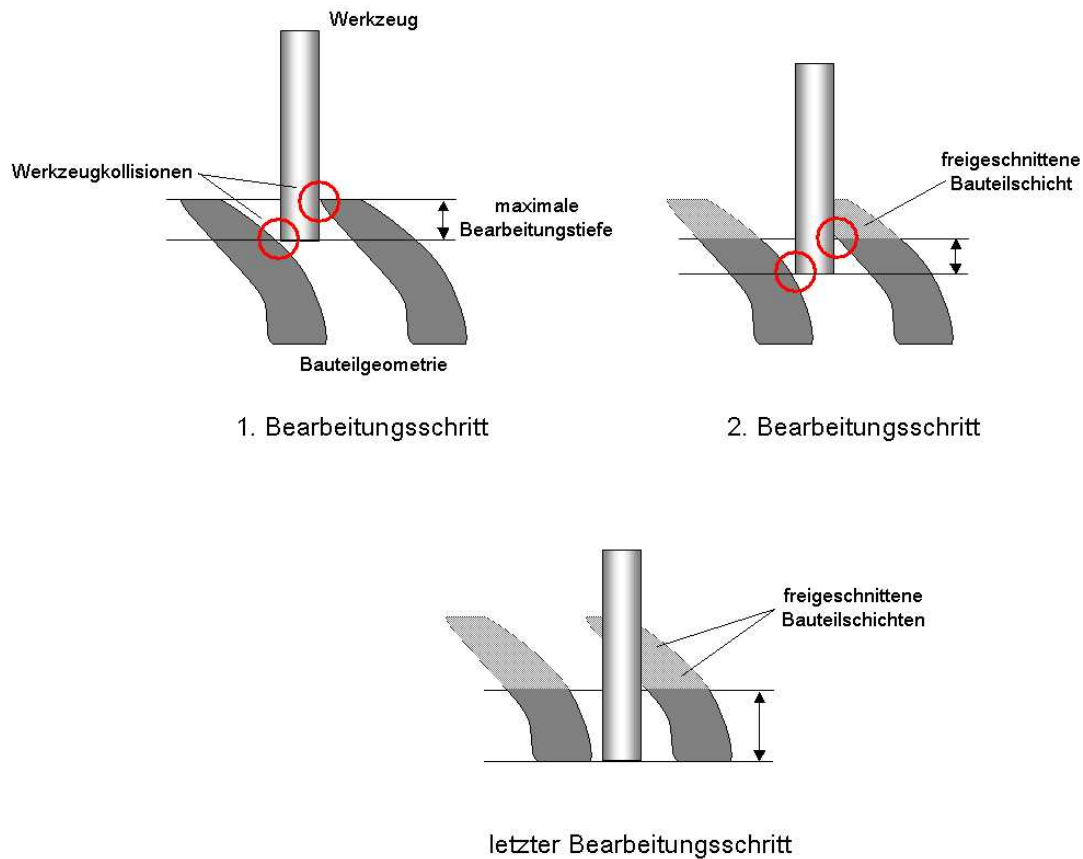


Abbildung 2-8: Prinzip der virtuellen Bauteilerlegung [4]

Die separierte Bauteilschicht wird im weiteren Verlauf der Prototypenherstellung als eigenständiges Bauteil betrachtet. Der „verbleibende“ Prototyp wird wiederum einer erneuten Kollisionsanalyse unterzogen und in entsprechende Bauteilschichten zerlegt. Auf diese Weise werden in Abhängigkeit von der Anzahl an Kollisionen einzelne kollisionsfreie und somit frästechnisch herstellbare Schichten erzeugt, welche im Anschluss an die Fertigung durch eine geeignete Füge-technik wieder miteinander zu verbinden sind.

Um den Fertigungsaufwand zu reduzieren, muss die Anzahl der Bauteilschichten so klein wie möglich sein. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist jeweils eine große Schichtdicke anzustreben. Die Schichtdicke ist in erster Linie von der Bearbeitungstiefe abhängig, welche durch die Parameter des verwendeten Werkzeugs und der Geometrie des Prototyps beeinflusst wird. Da die Geometrie nicht beeinflusst werden kann, kann nur über eine Werkzeugauswahl bzw. über die Werkzeugparameter, wie Bearbeitungslänge, den Durchmesser, den Eckenradius und die Freischnittlänge des Fräasers, die Schichtdicke optimiert werden.

In der Praxis kann die Werkzeugauswahl jedoch nicht allein anhand der Geometrie des Prototyps erfolgen. Wird beispielsweise ein Fräser mit einem Durchmesser von 1mm gewählt, so muss

berücksichtigt werden, dass dafür eine hohe Spindeldrehzahl der Fräsmaschine sowie geringe Vorschübe zur Vermeidung von Werkzeugbruch notwendig sind. Damit kann zum einen die maximale Spindeldrehzahl der Fräsmaschine die Nutzung eines solchen Fräasers verbieten und zum anderen erhöht sich durch den geringen Vorschub des Fräasers die Herstellungszeit des Prototyps. Grundsätzlich sollte daher der ausgewählte fräseridentische Körper so klein wie nötig und so groß wie möglich sein [2][4].

Die virtuelle Bauteilerlegung kann manuell nach dem beschriebenen Verfahren oder automatisch mittels einer Softwarelösung durchgeführt werden. In einer weiterführenden Arbeit von Lobeck [3] wurde für die Bauteilerlegung in Abhängigkeit der Werkzeugparameter ein Konzept erstellt und exemplarisch umgesetzt. Hierbei wurde auf der Basis eines kommerziellen CAD-Systems gezeigt, dass die im System bereits vorhandenen Funktionen zur Nutzung einer Bauteilerlegung herangezogen werden können. Dies ist nur deshalb möglich, da mit Hilfe einer offenen Programmierschnittstelle eines CAD-Systems eigenständige Softwarelösungen entwickelt werden können, welche auf die Funktionsbibliotheken des CAD-Systems zugreifen können.

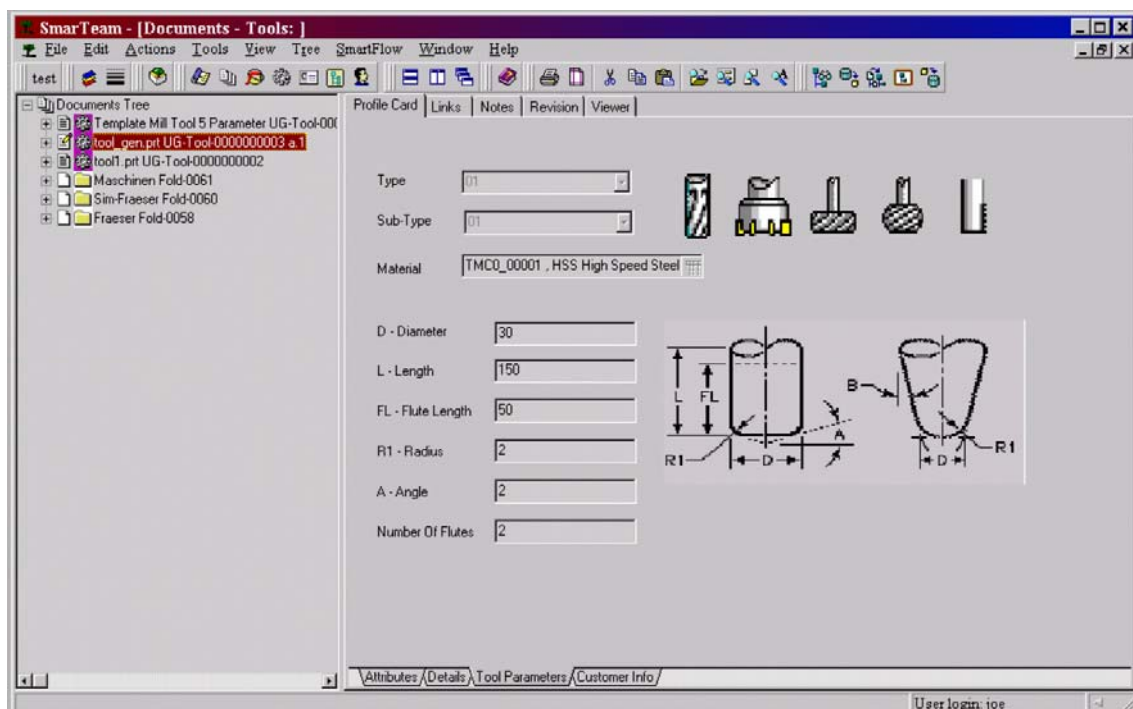


Abbildung 2-9: Kenngrößen zur Beschreibung von Werkzeugparametern [3]

Lobeck [3] hat der Forderung nach einer automatischen Bauteilerlegung in Abhängigkeit der Werkzeugparameter Rechnung getragen durch die Erstellung einer umfangreichen Werkzeugbibliothek. Aus Gründen einer effizienten Datenverwaltung wurde diese Bibliothek

innerhalb eines PDM²-Systems angesiedelt (vgl. **Abbildung 2-9**). Durch die Auswahl eines Fräsertyps und durch das Setzen der Werkzeugparameter wird ein fräseridentischer Körper im CAD-System aufgebaut (vgl. **Abbildung 2-10**).

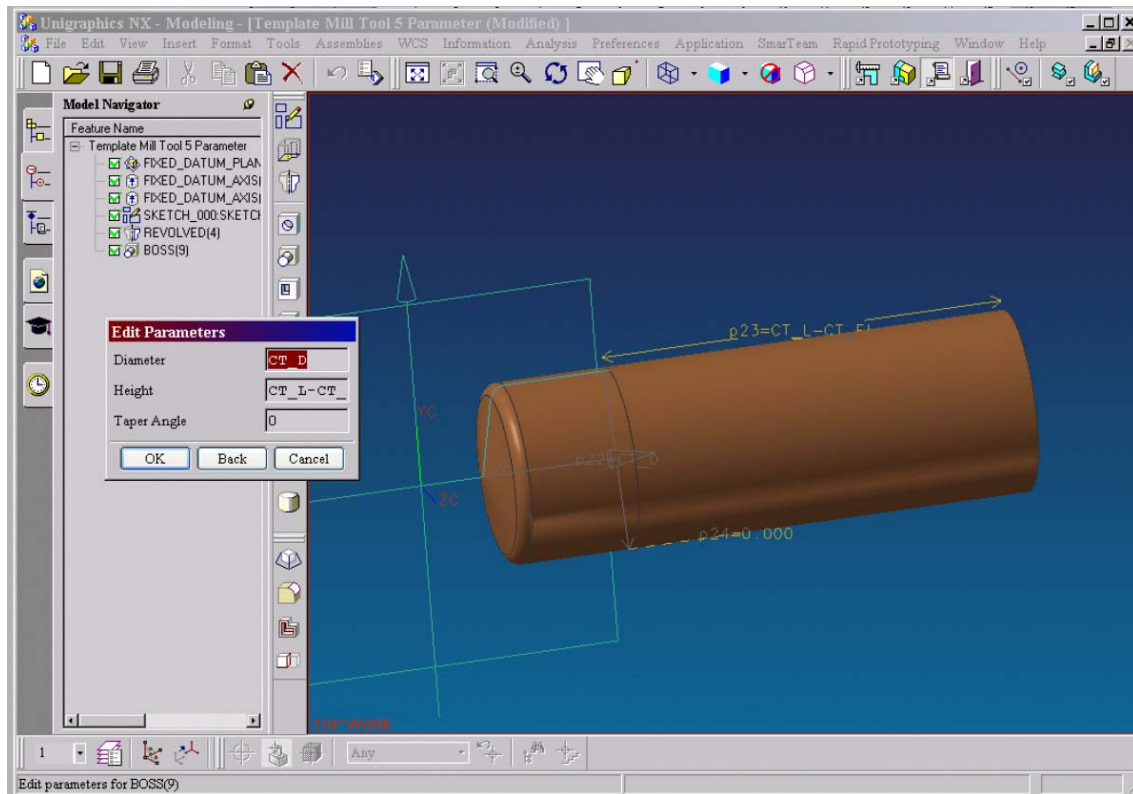


Abbildung 2-10: Modell eines fräseridentischen Körpers [3]

Zusammen mit dem zu analysierenden Prototyp wird der fräseridentische Körper in einer gemeinsamen Baugruppe einer automatischen Bauteilzerlegung unterzogen. Die dafür notwendige Kernfunktion stellt die Kollisions- bzw. Interferenzprüfung dar. Mit ihr werden die Kollisionen zwischen dem fräseridentischen Körper und dem Prototyp erkannt und daraus die Schichtendicken ermittelt (vgl. **Abbildung 2-11**). Als Ergebnis der Bauteilzerlegung liegt der herzustellende Prototyp in endlichen hinterschneidungsfreien Bauteilschichten vor. Die erzeugten Bauteilschichten werden ebenfalls von dem PDM-System verwaltet. Dabei stellt das PDM-System eine Verknüpfung her zwischen dem ungeschnittenen Prototyp und der Baugruppe, bestehend aus den einzelnen Bauteilschichten.

² PDM: Product Data Management

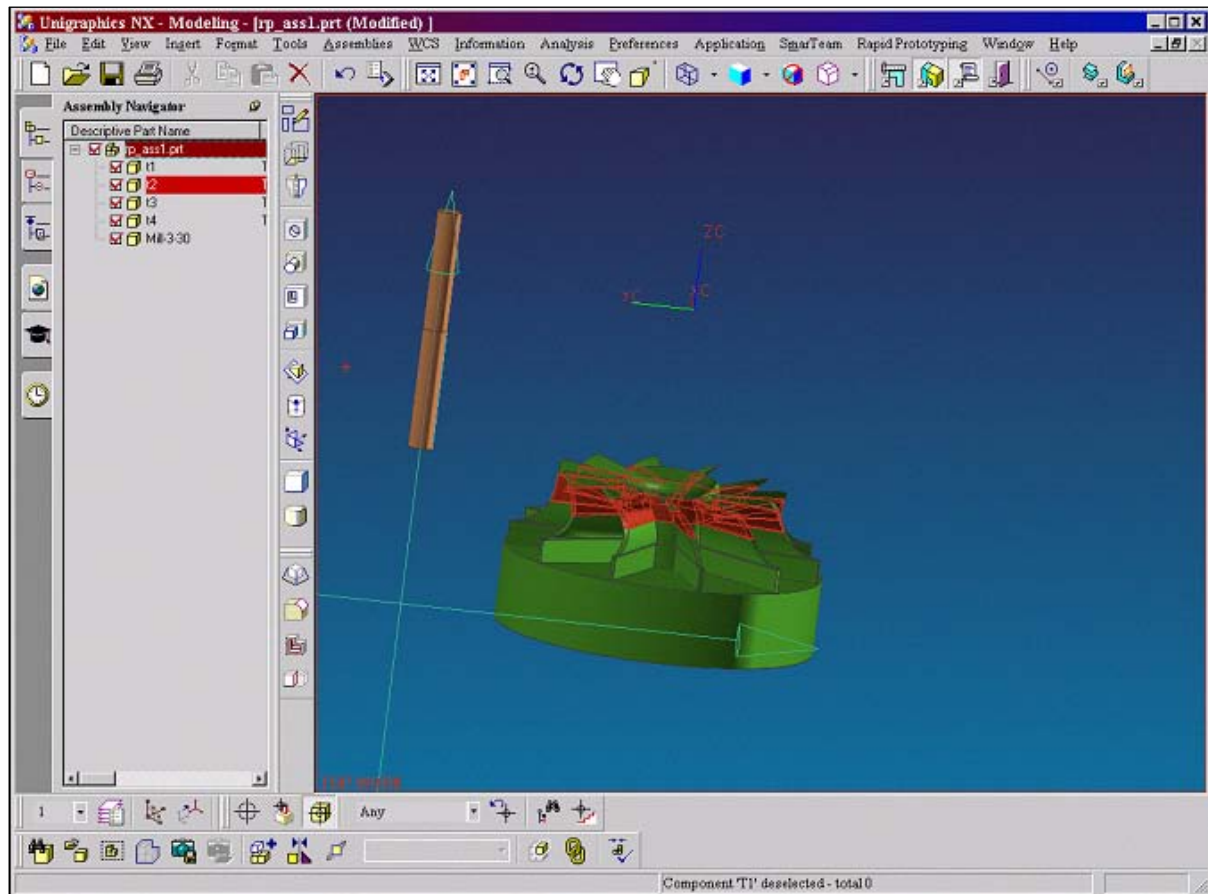


Abbildung 2-11: Baugruppe mit Bauteil und Fräser [3]

2.2.2 Erzeugung der inneren Hilfsgeometrie

Bei der inneren Hilfsgeometrie handelt es sich um zwei Bohrung-Zapfen-Kombinationen, welche den einzelnen Bauteilschichten hinzugefügt werden. Dazu werden im CAD-System die Trennebenen benachbarter Bauteilschichten um die Geometrie zweier Bohrungen bzw. zweier Zapfen erweitert. Hierbei erhält eine Bauteilschicht die Bohrungen und die darauf folgende Bauteilschicht die Zapfen. Damit es später beim Positionieren oder Fügen der einzelnen Bauteilschichten nicht zu Komplikationen kommt, ist darauf zu achten, dass diese in Position und Gestalt aufeinander abgestimmt sind. Dieser Vorgang kann manuell oder rechnerunterstützt erfolgen.

Bei der rechnerunterstützten Variante (vgl. Kapitel 2.2.1) beschränkt sich der Aufwand lediglich auf die Auswahl der inneren Hilfsgeometrie (Bohrung-Zapfen-Kombination), die Festlegung der geometrischen Abmessungen sowie das Selektieren einer einzigen Fügefläche. Die Auswahl der

inneren Hilfsgeometrie wird in dem PDM-System vorgenommen, in welchem die Bohrung-Zapfen-Kombination abgelegt ist (vgl. **Abbildung 2-12**).

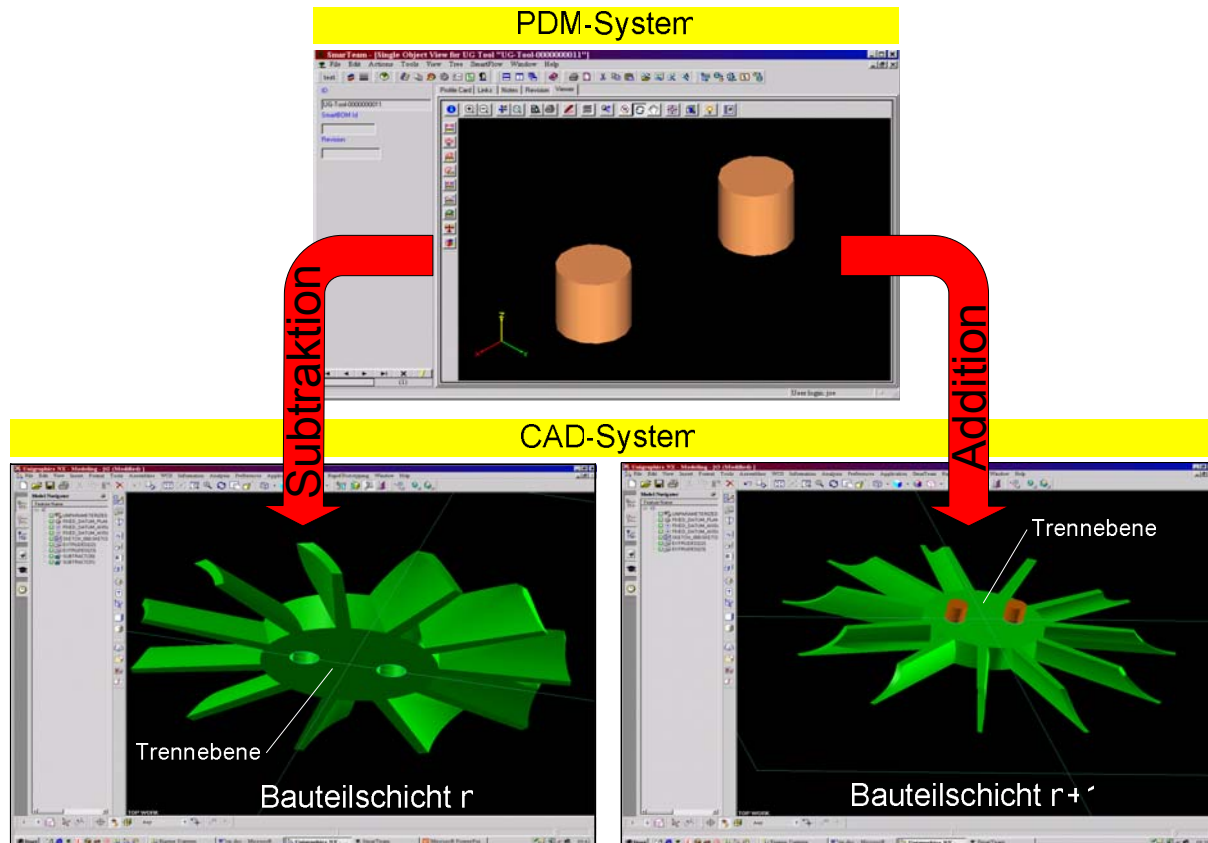


Abbildung 2-12: Einfügen der Bohrung-Zapfen-Kombination in die Trennebene nach [3]

Im Anschluss daran werden die geometrischen Angaben zu dem Durchmesser und der Länge der Bohrungen und Zapfen definiert. Nach der Selektion einer Fügefläche ermöglicht nun die Datenverwaltung des PDM-Systems ein automatisches Hinzufügen und Positionieren der Bohrung-Zapfen-Kombination zu jeder Bauteilschicht des Prototyps, vorausgesetzt, dass das CAD-System in das PDM-System integriert ist. Das Hinzufügen der Bohrungen und Zapfen ist in Form einer Booleschen Operation realisiert, so dass lediglich die Zapfen zu einer Bauteilschicht addiert oder subtrahiert werden. Eine rechnerunterstützte Auslegung im Sinne einer Festigkeitsbetrachtung liegt jedoch nicht vor. Diese Tatsache führt dazu, dass die Auslegung jeweils manuell durchgeführt werden muss, was mit einem zusätzlichen Zeitaufwand sowie mit einer Fehleranfälligkeit in der Durchführung verbunden ist.

2.2.3 Erzeugung des Rohmaterials

Die Grundlage für die Erzeugung des Rohmaterials bzw. dessen Abmessungen sind die in der virtuellen Bauteilzerlegung generierten Schichten des Prototyps. Bei der Bestimmung der Rohmaterialabmessungen ist grundsätzlich ein Materialaufmass zu berücksichtigen, um durch Planfräsen eventuelle Oberflächenbeschädigungen ausgleichen zu können. Unter der Voraussetzung, dass eine Bearbeitung der Schichtgeometrie aus Richtung der Unter- und Oberseite erforderlich ist und diese im zweiten Fertigungsschritt mit Hilfe der Hilfsgeometrie gespannt werden soll, ergibt sich für eine Bauteilschicht mit positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie (Anfangs- oder Endschicht) die Rohmaterialhöhe h_g nach **Abbildung 2-13**. Die eigentliche Schichthöhe h_1 ist zusätzlich um die Höhe h_2 der Zapfen sowie um die Höhe eines Spannbereichs h_3 zu ergänzen.

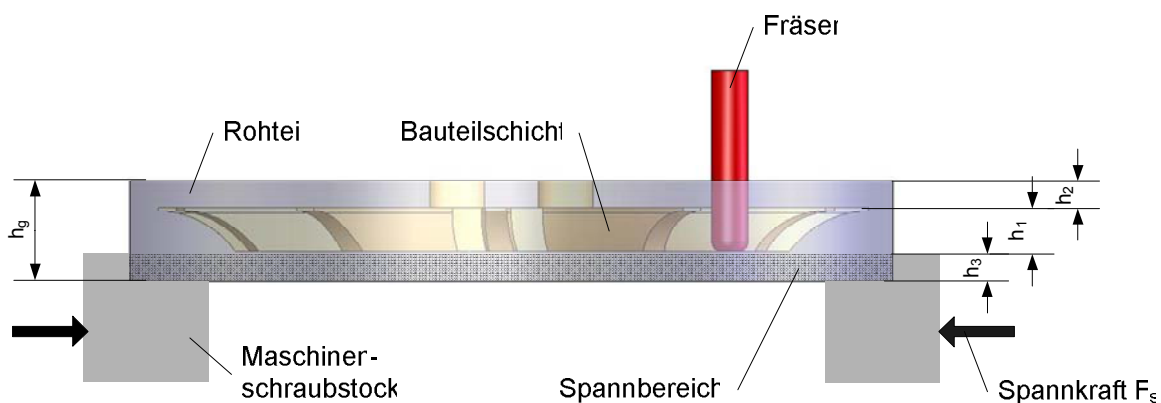


Abbildung 2-13: Rohteilabmessungen für Bauteilschicht mit positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie

Der Spannbereich h_3 dient in der ersten Aufspannung zur Aufnahme in den Maschinenschraubstock und ist deshalb von der Bearbeitung ausgeschlossen. Dadurch ist eine umfassende Bearbeitung der Kontur möglich, ohne dass der Fräser mit dem Maschinenschraubstock kollidiert. Die Höhe des Spannbereiches h_3 muss so bemessen sein, dass das Rohmaterial sicher und verformungsfrei in den Spanbacken des Maschinenschraubstockes aufgenommen werden kann. Zu beachten ist, dass sich die Rohmaterialhöhe h_g für eine Bauteilschicht mit negativ ausgeprägter Hilfsgeometrie (Anfangs- oder Endschicht) um die Höhe h_2 reduziert. Verfügt die herzustellende Bauteilschicht über positiv und negativ ausgeprägte Hilfsgeometrien (Mittelschicht), so entfällt der Spannbereich h_3 . Dieser kann durch die Höhe h_2 der Zapfen berücksichtigt werden.

2.3 Kontur erzeugen

Die Eingangsgrößen für die Erzeugung der Kontur der einzelnen Bauteilschichten sind die aus der datentechnischen Ausführung für die Fräsbearbeitung aufbereiteten CAD-Daten. Das Bindeglied zu der anschließenden fertigungstechnischen Ausführung stellt die Erstellung der NC³-Codes dar. Der NC-Code beinhaltet die Geometriedaten der zu fertigenden Bauteilschicht in einem für die CNC⁴-Fräsmaschine lesbaren Datenformat. Die frästechnische Ausführung der einzelnen Bauteilschichten ist durch eine zweiseitige Bauteilbearbeitung gekennzeichnet. Im Zuge dessen dient die Hilfsgeometrie in ihrer positiven und negativen Ausprägung als Spanntechnik während der Bearbeitung.

2.3.1 NC-Code-Generierung

Unter der Generierung eines NC-Codes wird die Erstellung von Steuerinformationen zur Bearbeitung eines Werkstücks auf einer CNC-Werkzeugmaschine verstanden. Das Programmieren solcher NC-Codes kann grundsätzlich manuell an der CNC-Steuerung der Werkzeugmaschine oder rechnerunterstützt am PC erfolgen. Mit steigender Komplexität des Werkstückes in Bezug auf eine dreidimensionale Fräsbearbeitung (Freiformflächen) ist jedoch eine manuelle Programmierung äußerst aufwändig und in der Praxis nicht mehr realisierbar. Die Erstellung der NC-Codes erfolgt daher fast ausschließlich computerunterstützt am PC. Dafür ist eine spezielle Programmiersoftware notwendig (CAM⁵-Software). Durch den Einsatz von CAD-Systemen nutzt die CAM-Software für die Generierung des NC-Codes das dort bereits vorliegende Datenmodell des Bauteils. Damit entfällt eine aufwändige manuelle Geometriedefinition des Bauteils [7].

Neben einer grafischen Benutzeroberfläche zur Auswahl von Bearbeitungswerkzeugen, Bearbeitungsstrategien, usw. bietet die CAM-Software die Möglichkeit der grafischen Simulation der Bearbeitung anhand des erstellten NC-Codes. Damit kann eine Kontrolle durchgeführt werden, bevor der NC-Code zum Einsatz freigegeben wird. Die **Abbildung 2-14** zeigt die CAM-Software *CamWorks* des Herstellers *TEKSOFT*.

³ NC: Numerical Control

⁴ CNC: Computerized Numerical Control

⁵ CAM: Computer Aided Manufacturing

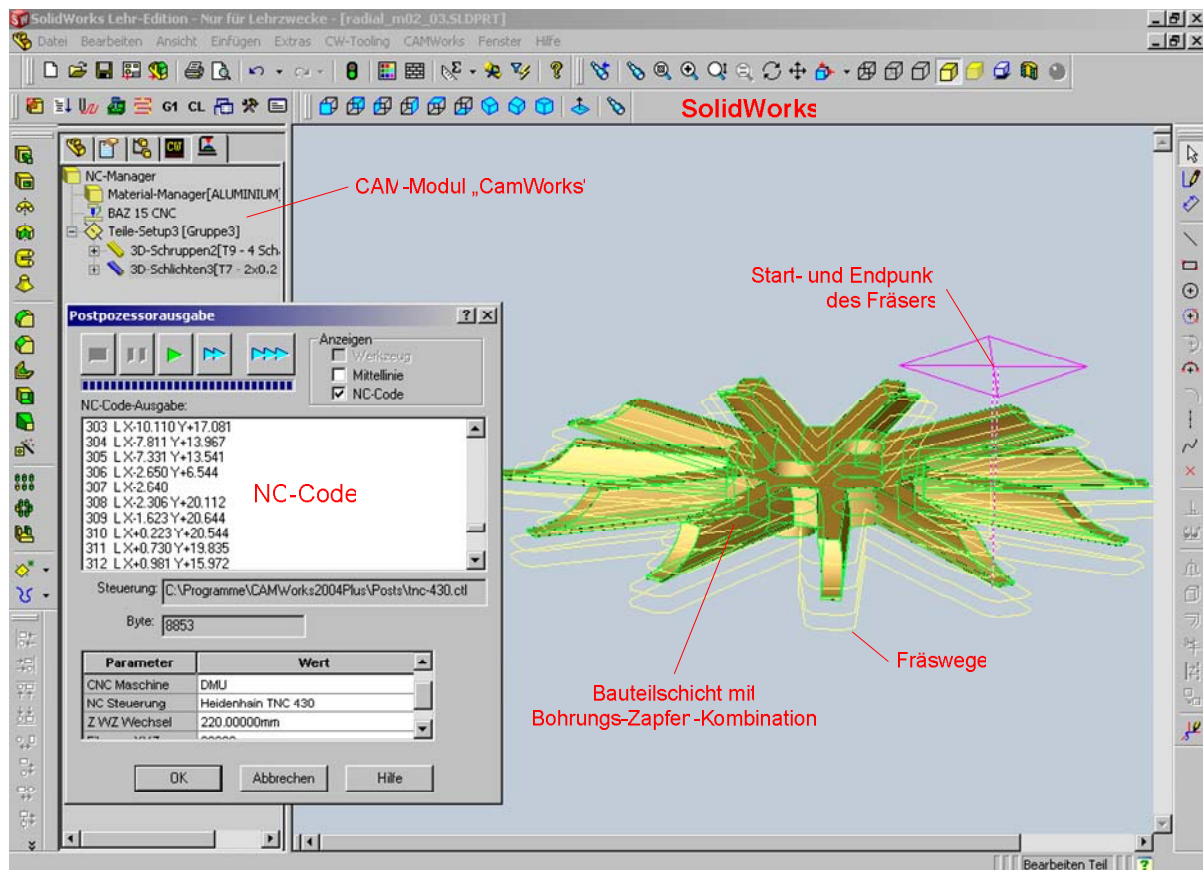


Abbildung 2-14: Erstellung des NC-Codes mit CamWorks

Eingebunden in die Benutzeroberfläche des CAD-Systems *SolidWorks* kann das dort vorhandene Datenmodell direkt zur Erstellung des NC-Codes herangezogen werden. Die Bearbeitungswege sowie die Simulation der gesamten Bauteilbearbeitung können visualisiert werden, so dass sich das Fräsergebnis im Vorfeld beurteilen lässt. Im Anschluss daran wird der NC-Code mittels eines Postprozessors der CAM-Software generiert. Der Postprozessor ist speziell auf die CNC-Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine abgestimmt und berücksichtigt firmenspezifische Unterschiede im NC-Code zwischen den einzelnen Werkzeugmaschinenherstellern. Nach der Erzeugung des NC-Codes wird dieser in einer Datei gespeichert und auf die CNC-Steuerung der Bearbeitungsmaschine übertragen.

2.3.2 Zweiseitige Bauteilbearbeitung

Die Bearbeitung der einzelnen Bauteilschichten wird sowohl aus der Richtung der Unter- als auch der Oberseite vorgenommen, um eine vollständige Herstellung der Bauteilschichten zu gewährleisten. Um Werkstücke frästechnisch bearbeiten zu können und um ihre relative Lage auf

dem Maschinentisch klar zu definieren, ist es notwendig, diese fest einzuspannen. Bei einfachen geometrischen Strukturen wie Quader, Zylinder, etc. kann die Einspannung dabei über herkömmliche Spannelemente wie beispielsweise die Spannbacken eines Maschinenschraubstockes erfolgen. Komplexe geometrische Strukturen wie z.B. Freiformflächen können jedoch nicht ohne weiteres mit herkömmlichen Techniken gespannt werden. Um auch Bauteile komplexerer Struktur problemlos spannen bzw. fertigen zu können, werden dafür die in Kapitel 2.2.2 vorgestellten inneren Hilfsgeometrien genutzt.

Für eine eindeutige Lagepositionierung auf dem Maschinentisch sowie unter dem Aspekt der späteren Nutzung als Positionier- und Fügetechnik ist es erforderlich, dass die Hilfsgeometrie sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen unterbindet. Die Geometrie einer einzelnen Bohrung-Zapfen-Kombination unterbindet jedoch nur eine translatorische Bewegung. Durch Hinzunehmen einer zweiten Bohrung-Zapfen-Kombination pro Schnittebene wird zusätzlich eine rotatorische Bewegung verhindert.

Im Folgenden wird die zweiseitige Bauteilbearbeitung anhand von zwei aufeinander folgenden Bauteilschichten und die Nutzung der inneren Hilfsgeometrie in ihrer positiven und negativen Ausprägung als Spanntechnik erläutert.

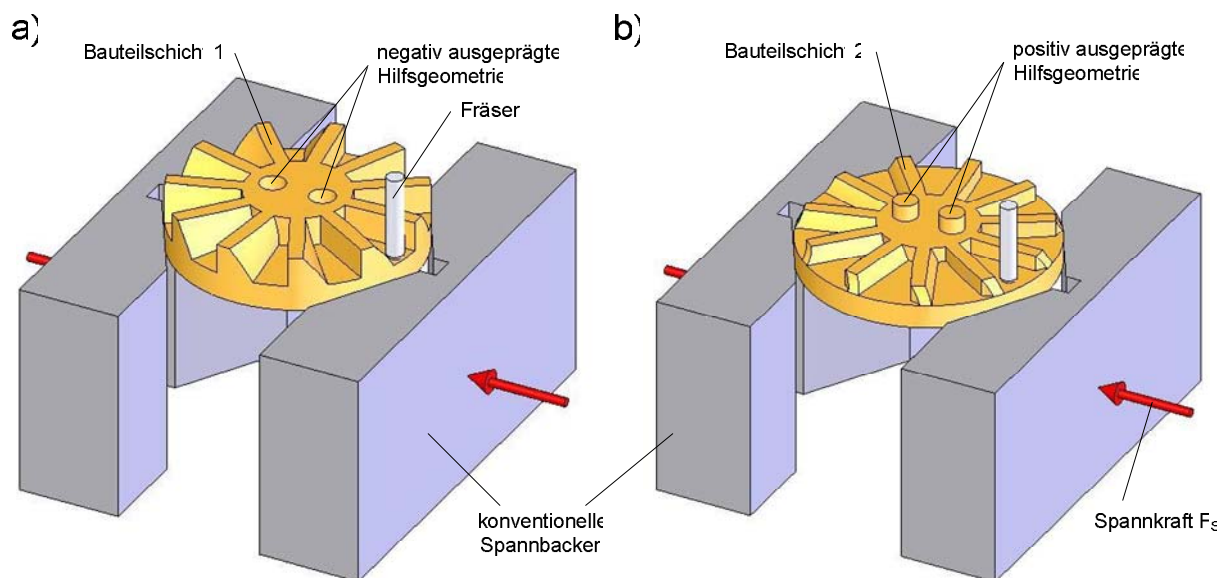


Abbildung 2-15: 1. Fertigungsschritt: a) Bauteilschicht mit Bohrungen, b) Bauteilschicht mit Zapfen

Im ersten Fertigungsschritt wird die Bearbeitung aus der Richtung der Unterseite durchgeführt. Da das Rohmaterial einer einfachen geometrischen Struktur entspricht, kann es mittels

konventioneller Spannmittel auf dem Maschinentisch fixiert werden. In der ersten Aufspannung wird neben der Erstellung der eigentlichen Schichtgeometrie auch die Hilfsgeometrie herausgearbeitet (vgl. **Abbildung 2-15**). Für eine umfassende frästechnische Bearbeitung ist es erforderlich, dass der Fräser einen uneingeschränkten Zugang zur Bauteilschicht vorfindet. Dies wird, wie bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert, durch die Zugabe eines Spannbereichs h_3 zur Rohmaterialhöhe h_1 erreicht.

Nach Beendigung der Fertigung aus der Richtung der Unterseite wird im zweiten Fertigungsschritt die Bauteilschicht um 180° gewendet und anschließend aus der Richtung der Oberseite bearbeitet. Dazu werden die Bauteilschichten mit Hilfe der zuvor erstellten Hilfsgeometrien gespannt. Die Nutzung der Hilfsgeometrie ermöglicht wie im ersten Fertigungsschritt eine umfassende Bearbeitung der Bauteilschicht ohne dass störende Spanntechniken wie beispielsweise Spannpratzen die Zugänglichkeit des Fräasers behindern.

Die Aufspannung mittels positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie geschieht mittels normaler Spannbacken (vgl. **Abbildung 2-16**). Damit die Linienbelastungen während des Spannens an den Mantelflächen der Zapfen nicht zu groß werden und es in diesen Bereichen nicht zu plastischen Abflachungen kommt, sind die Zapfen angefast und gestatten somit die Übertragung größerer Spannkraften [4]. In der Praxis hat sich das Anfasen der Zapfen jedoch als nicht ausreichend erwiesen, da die durch die Spannbacken des Maschinenschraubstocks aufgebrauchten Spannkraften meist zu einer plastischen Gesamtverformung der Zapfen führen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Position der Bauteilschicht im Maschinenschraubstock nicht reproduzierbar ist. So kann diese vor dem Aufbringen der Spannkraft des Maschinenschraubstockes entlang der Spannbacken (in x-Richtung) verschoben werden (vgl. **Abbildung 2-16b**). Für die Fräsbearbeitung ist unbedingt erforderlich, dass die Position der Bauteilschicht der Fräsmaschine durch Einmessen und Setzen eines Referenznullpunktes bekannt gemacht wird. Dies ist jedoch unter Umständen nicht möglich, wenn die Bauteilschicht über keine definierte Kontur zum Antasten und Setzen des Referenznullpunktes verfügt. Diese Problematik kann vor allem im zweiten Fertigungsschritt auftreten, da der vorangegangene erste Fertigungsschritt die Bezugsgeometrien durch die Fräsbearbeitung verändert bzw. abgetragen haben kann.

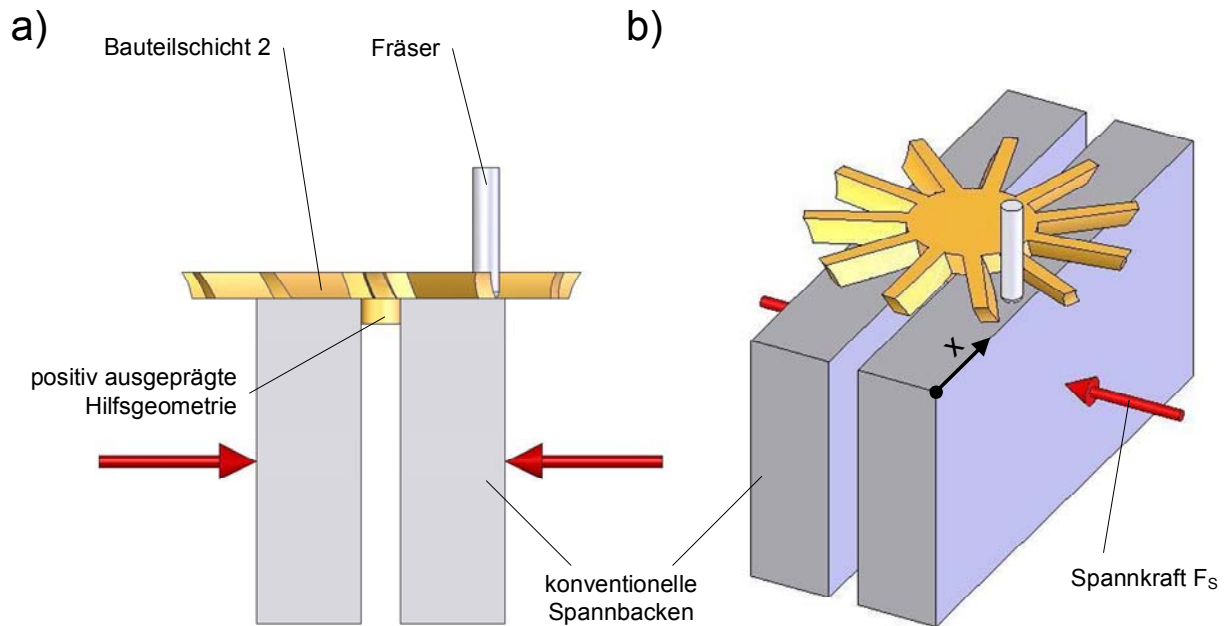


Abbildung 2-16: 2. Fertigungsschritt - Spannen mittels positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie

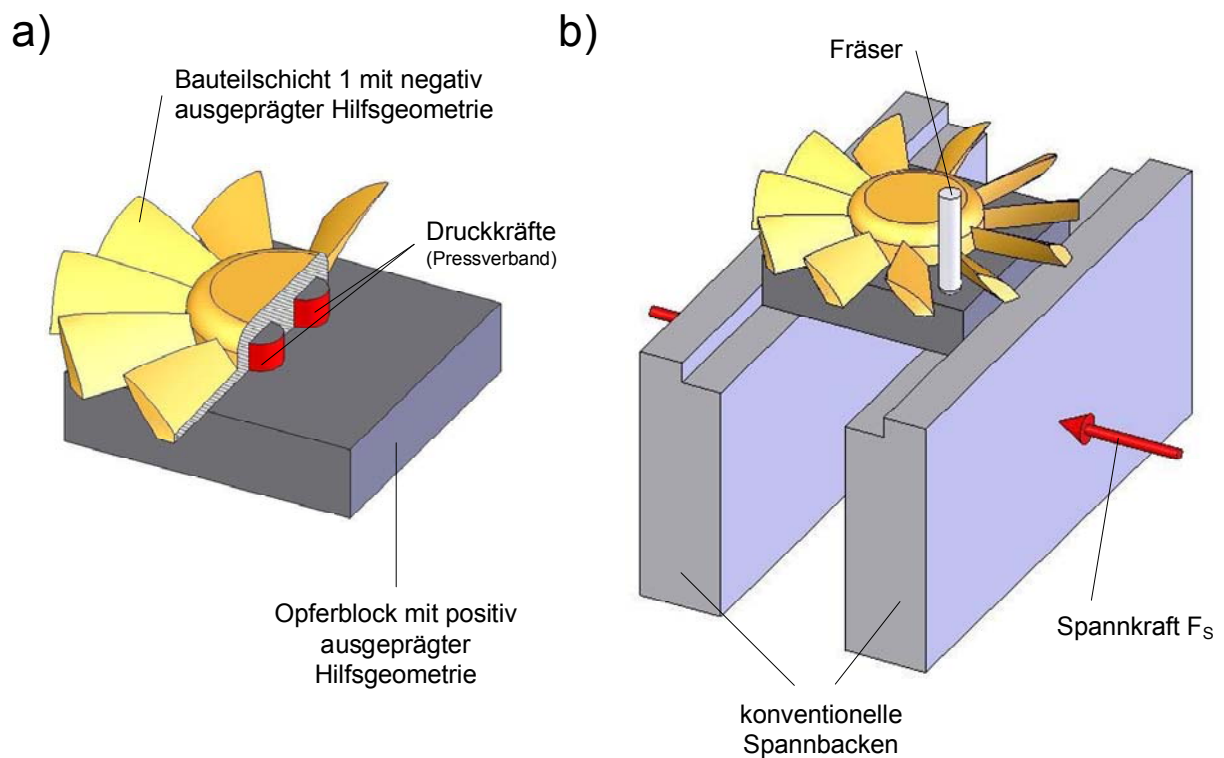


Abbildung 2-17: 2. Fertigungsschritt - Spannen mittels negativ ausgeprägter Hilfsgeometrie

Für die Fixierung der Bauteilschicht mit negativ ausgeprägter Hilfsgeometrie ist ein so genannter Opferblock notwendig. Die Form der positiv ausgeprägten Hilfsgeometrie des Opferblockes

entspricht der negativ ausgeprägten Hilfsgeometrie der zu spannenden Bauteilschicht. Dies sind zwei kreiszylindrische Zapfen, welche gegenüber den Bohrungen der zu spannenden Bauteilschicht mit einem Übermaß versehen sind. Das Übermaß auf den Zapfen führt zu einem Pressverband zwischen der positiv und negativ ausgeprägten Hilfsgeometrie und verhindert ein Ablösen der Bauteilschicht in Folge von Bearbeitungskräften (vgl. **Abbildung 2-17**). Bei der Wahl des Übermaßes ist zu berücksichtigen, dass ein problemloses Entfernen der Bauteilschicht vom Opferblock nach der Fertigung gewährleistet sein muss. Da der Opferblock speziell für die Bohrungsdurchmesser der zu spannenden Bauteilschicht angefertigt wird, handelt es sich dabei um eine Art „verlorene Spannhilfe“, da nur Bohrungen mit dem gleichem Durchmesser aufgenommen werden können.

In der Praxis ergeben sich allerdings Schwierigkeiten beim Spannen der negativ ausgeprägten Hilfsgeometrie. Diese resultieren aus den unvermeidbaren Fertigungsabweichungen bei der Herstellung der Hilfsgeometrie sowie des Opferblockes. Zum einen kommt es dabei grundsätzlich zu einer mechanischen Überbestimmung in der Schnitt- bzw. Fügeebene und zum anderen zu Problemen bei der frästechnischen Herstellung der Übermaßpassung zwischen Bohrungen und Zapfen. Der Grund für die Überbestimmung liegt in den zwei Bohrung-Zapfen-Kombinationen pro Schnittebene (vgl. **Abbildung 2-18**). Zum problemlosen Spannen der Bauteilschicht auf dem Opferblock, muss der Achsabstand **B** der Bohrungen der Bauteilschicht gleich dem Achsabstand **Z** der Zapfen des Opferblockes sein.

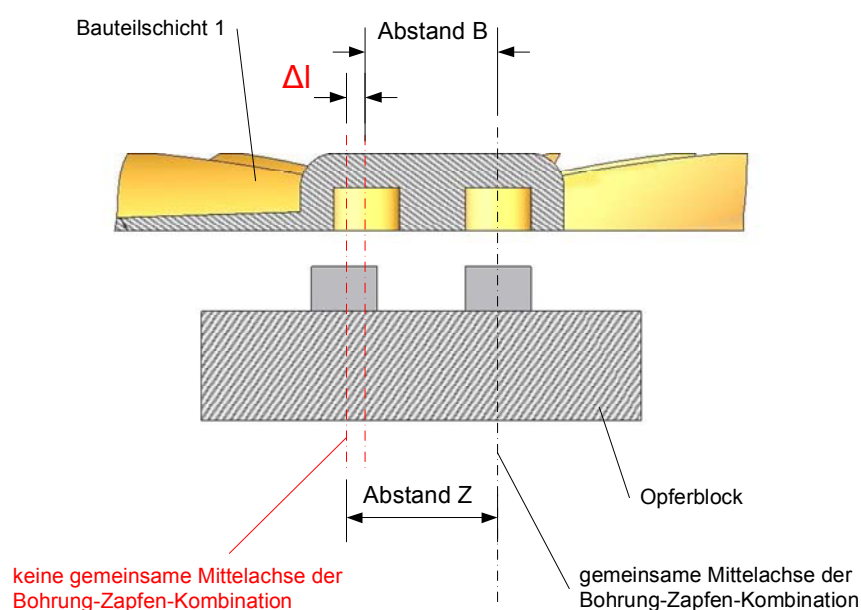


Abbildung 2-18: Problematik des Spanns mittels Opferblock

Durch die Positioniergenauigkeit Δl der CNC-Fräsmaschine kann diese Forderung nicht erfüllt werden, mit dem Ergebnis, dass die Bohrungen und Zapfen keine gemeinsame Mittelachse aufweisen. Dieses Problem führt in Abhängigkeit von der erreichten Achsabstandsdifferenz zu folgenden Schwierigkeiten. Bei zu großer Abstandsdifferenz ist ein Aufschieben der Bauteilschicht auf den Opferblock nicht möglich. In diesem Fall ist die Bauteilschicht Ausschuss oder der Opferblock muss neu angefertigt werden. Wenn die Fertigungsabweichung klein ist, so ist ein Aufschieben der Bauteilschicht auf den Opferblock zwar möglich, jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Pressverbände auf ihrem vollen Umfang tragen, wodurch die Haltekraft während der Bearbeitung vermindert wird.

Die Positioniergenauigkeit Δl eines konventionellen 3-Achs-CNC-Bearbeitungszentrums wie z.B. die des Bearbeitungszentrums *BAZ 15 CNC 60.40* der Firma *Alzmetall* beträgt entlang jeder Verfahrachse (x, y und z) $\pm 0,015\text{mm}$ [8]. Daraus ergeben sich folgende theoretische Überlegungen, welche den beschriebenen Sachverhalt unterstreichen:

Wird beispielsweise ein Bohrungsabstand **B** von 6mm angestrebt, so kann die Positioniergenauigkeit entlang der x-Achse zu einem vergrößerten Ist-Bohrungsabstand von 6,03mm führen. Die Verdoppelung der Positioniergenauigkeit Δl liegt darin begründet, dass sowohl die Mittelachse der ersten als auch der zweiten Bohrung verschoben sein können. Dieselbe Überlegung ist auf die Zapfengeometrie des Opferblockes zu übertragen, wobei es dort im ungünstigsten Fall zu einer Verkleinerung des Soll-Zapfenabstandes auf 5,97mm kommen kann. Damit ergibt sich allein aus der Positioniergenauigkeit Δl eine Achsabstandsdifferenz zwischen dem Bohrung- und dem Zapfenpaar von 0,06mm. In Verbindung mit dem notwendigen Übermaß zur Übertragung von Bearbeitungskräften führt dieser Sachverhalt zu nicht fügbaren Bohrungs-Zapfenpaarungen zwischen Bauteilschicht und Opferblock.

Die zweite Schwierigkeit liegt in der bereits angesprochenen frästechnischen Herstellung der Übermaßpassungen. Während sich die Bohrungsdurchmesser hochgenau durch Reiben herstellen lassen, so ergeben sich insbesondere bei der Herstellung der Zapfengeometrie Abweichungen. Diese entstehen dadurch, dass diese bei der Fertigung vom Fräs Werkzeug umfahren werden müssen. In Abhängigkeit vom Durchmesser und der Ausspannlänge des Fräasers sowie der Wahl der Schnittparameter kann es zu Verformungen am Fräser kommen, so dass die Gestalt der Zapfen negativ beeinflusst wird. Dies führt zu einer Maß- und Formabweichung, so dass das gewählte Übermaß für die Passung nicht realisiert werden kann. Dieses Problem verschärft sich

mit abnehmendem Zapfendurchmesser, da das Toleranzfeld immer kleiner wird. Hinzu kommt, dass Zapfen mit einem kleinen Durchmesser ebenfalls in Folge von Zerspankräften verformt werden können, was auch zu einer Maß- und Formabweichung führt.

2.4 Schichten fügen

Im Anschluss an die Konturerzeugung geschieht das Fügen der einzelnen Bauteilschichten zum Prototyp. Für den Fügeprozess müssen die Bauteilschichten des Prototyps untereinander positioniert werden. Das Positionieren kann mit Hilfe der Bohrung-Zapfen-Kombination durchgeführt werden. Durch die Wahl einer Übermaßpassung ist es möglich, die Hilfsgeometrie zusätzlich als Fügetechnik zu nutzen.

2.4.1 Bauteilschichten positionieren

Wird ein Prototyp mittels klassischer Fügeverfahren verbunden, wie z.B. dem Verschrauben oder Kleben, müssen die Schichten untereinander positioniert werden. Diese Notwendigkeit wird gerade beim Kleben deutlich, da dieser Prozess meist durch das Aufbringen einer Druckspannung senkrecht zur Klebefläche und durch eine Aushärtezeit gekennzeichnet ist. Das Aufbringen der Druckspannung kann bei komplexen Flächen zu einem Auseinandergleiten der Bauteilschichten führen. Das Positionieren kann grundsätzlich über speziell für einen Prototyp angefertigte Vorrichtungen vorgenommen werden. Die Erstellung einer solchen Vorrichtung ist jedoch mit einem Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

Hinzu kommt, dass eine exakte Ausrichtung anhand von Referenzkanten oder Referenzebenen bei Prototypen mit einer komplexen Geometrie unter Umständen nicht möglich ist. Abhilfe bieten hier die bereits als Spanntechnik für den Herstellungsprozess verwendeten Bohrung-Zapfen-Kombinationen. Diese sind aber bereits in der datentechnischen Ausführung als enge Spielpassung auszulegen, damit ein Positionieren der einzelnen Bauteilschichten untereinander gegeben ist (vgl. **Abbildung 2-19**).

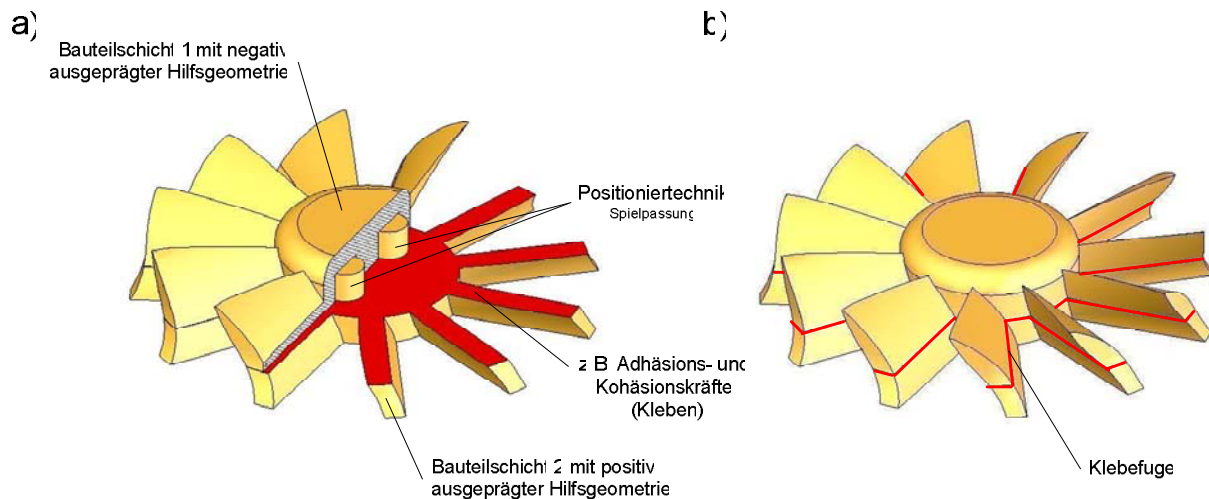


Abbildung 2-19: a) Bohrung-Zapfen-Kombination zur Positionierung b) gefügter Zustand mittels Kleben

Für ein exaktes Positionieren ist es notwendig, dass der Achsabstand B der Bohrungen gleich dem Achsabstand Z der Zapfen ist. Durch die in Kapitel 2.2.3 bereits diskutierte Positioniergenauigkeit Δl ist dies jedoch nicht gegeben (vgl. **Abbildung 2-20**).

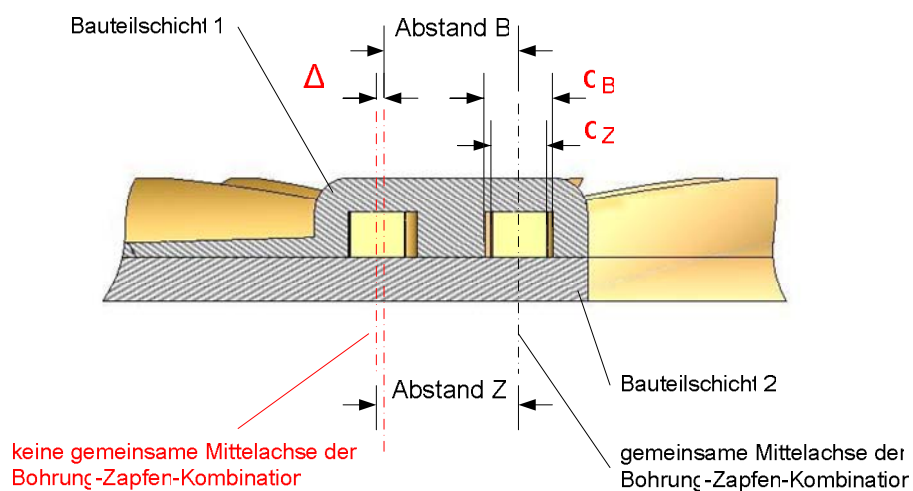


Abbildung 2-20: Suboptimale Positionierung mittels Bohrung-Zapfen-Kombination

In Kombination mit eng ausgelegten Spielpassungen, welche zum exakten Positionieren zwingend erforderlich sind, kann dies zu Bohrung-Zapfen-Kombinationen führen, welche nicht zusammen geschoben werden können. Diesem Sachverhalt kann nur durch die Wahl einer größeren Spielpassung zur Kompensation der Positioniergenauigkeit Δl entgegen gewirkt werden, wodurch die Positionierung mittels Bohrung-Zapfen-Kombinationen als suboptimal einzustufen ist.

2.4.2 Bauteilschichten fügen

Soll ein Fügeprozess durch die Nutzung der Bohrung-Zapfen-Kombination realisiert werden, so ist dies bereits in der datentechnischen Ausführung zu berücksichtigen. Die Bohrung-Zapfen-Kombination ist dann im Gegensatz zu den Ausführungen in Kapitel 2.4.1 als Pressverband zu gestalten (vgl. **Abbildung 2-21**), indem die Zapfen mit einem Übermaß gegenüber den Bohrungen versehen werden.

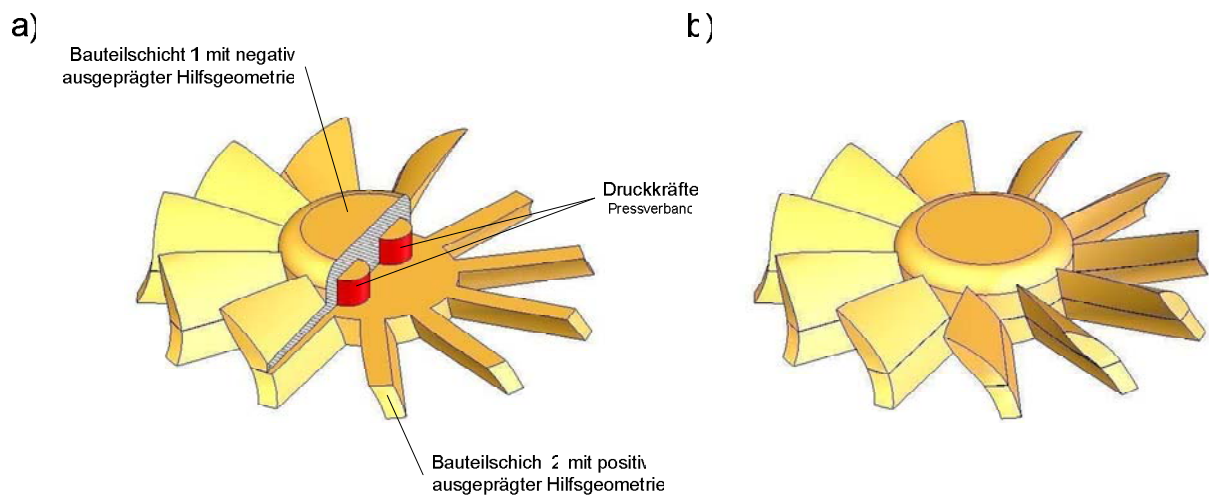


Abbildung 2-21: a) Bohrung-Zapfen-Kombination als Pressverband, b) gefügter Zustand

Damit die Luft aus dem Pressverband während des Fügevorganges entweichen und die Bauteilschichten ganz zusammengedrückt werden können, sind die Zapfen mit gegenüber liegenden Fasen zu versehen (vgl. **Abbildung 2-22**). Dadurch kommt es zu einer Minimierung der Kontaktfläche und damit zu einer verminderten übertragbaren Betriebskraft.

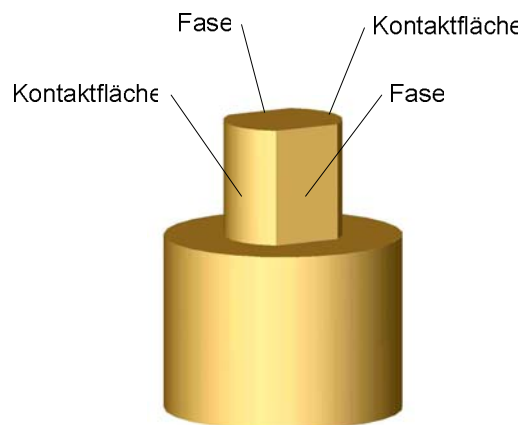


Abbildung 2-22: Zapfen mit Fasen und Kontaktflächen [4]

Andererseits sind die Anfasungen aber auch erforderlich, um eine sichere Spannmöglichkeit im Maschinenschraubstock während des zweiten Fertigungsschrittes zu gewährleisten (vgl. Kapitel 2.3.2). In der Praxis kommt es beim Fügen mittels der Bohrung-Zapfen-Kombination bedingt durch die Fertigungsabweichungen zu den bereits in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Problemen bezüglich der mechanischen Überbestimmung und der Herstellung von Übermaßpassungen (vgl. **Abbildung 2-23**).

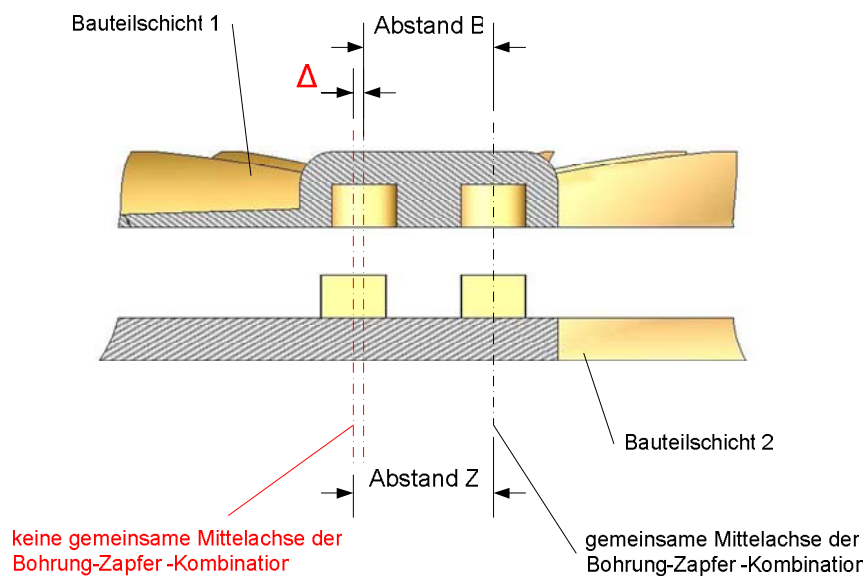


Abbildung 2-23: Problematik des Fügens mittels Bohrung-Zapfen-Kombination

Durch das notwendige Übermaß zwischen Bohrungen und Zapfen ist eine Kompensation der Fertigungsabweichungen durch die Wahl einer größeren Spielpassung, wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, nicht möglich. Weiterhin verhindert das Übermaß ein probeweises Zusammenlegen der Bauteilschichten. Das hat zur Folge, dass eine Fertigungskontrolle vor dem Fügeprozess nicht durchführbar ist. Diese ist jedoch erforderlich, um das Fräsergebnis beurteilen zu können. So entstehen beispielsweise durch die spanende Bearbeitung Grate, welche ein vollständiges Zusammenschieben der Bauteilschichten verhindern würde. Auch die Kontrolle des Konturübergangs von Bauteilschicht zu Bauteilschicht ist nicht durchführbar. Ist der Prototyp einmal gefügt, so ist ein Trennen oft nicht möglich. So ist es z.B. denkbar, dass aufgrund von Freiformflächen keine äußeren Zugkräfte am Prototyp aufgebracht werden können. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass ein Trennen zur Zerstörung des Prototyps bzw. einzelner Bauteilschichten führen könnte. Auch ein Durchdrücken des Pressverbandes ist nicht möglich, da dieser im inneren des Prototyps angeordnet und daher von außen nicht zugänglich ist. Unter der Voraussetzung der beschriebenen Umstände ist das Fügen mittels Bohrung-Zapfen-

Kombination als irreversibel einzustufen. Im Falle eines unerkannten Grates in der Schnittebene hätte dies die Erstellung eines neuen Prototyps zur Folge, was mit Zeit und Kosten verbunden wäre. Ferner verhindert die Irreversibilität eine Modifizierung des Prototyps durch Austauschen einzelner Bauteilschichten. Änderungen an einem Prototyp haben meistens eine Neuerstellung zur Folge. In der Praxis hat sich daher die Nutzung der Bohrung-Zapfen-Kombination zum Fügen der Bauteilschichten als problematisch erwiesen.

2.5 Fazit

Grundsätzlich ist die Prototypenherstellung mittels des MLJ-Verfahrens möglich. Jedoch ergeben sich bei einer genauen Analyse des gesamten Herstellungsprozesses Schwachstellen, welche ein erhebliches Verbesserungspotenzial aufweisen. Im Folgenden werden die wesentlichen Defizite zusammenfassend dargestellt:

- Eine rechnerunterstützte Auslegung der Bohrung-Zapfen-Kombination im Sinne einer Festigkeitsbetrachtung liegt nicht vor.
- Eine Bohrung-Zapfen-Kombination ist mechanisch überbestimmt und führt deshalb zu Schwierigkeiten
 - bei der Nutzung als Spanntechnik während der zweiseitigen Bauteilbearbeitung,
 - bei der Nutzung zum Positionieren der Bauteilschichten sowie
 - bei der Nutzung als Fügetechnik.
- Der Maschinenschraubstock zur Aufnahme von Bauteilschichten mit Zapfen verursacht plastische Verformungen.
- Die Übermaßpassung zwischen den Bohrungen und den Zapfen schränkt eine Fertigungskontrolle ein.
- Das Fügen mittels Bohrung-Zapfen-Kombination ist irreversibel und deshalb ist ein Modifizieren des Prototyps durch Austauschen einzelner Schichten nicht möglich.
- Die alleinige Beschränkung auf die Frästechnologie zur Herstellung von Prototypen schließt andere Fertigungsverfahren aus.

Zur Lösung der Defizite werden im Folgenden die Anforderungen an eine speziell für den Prototypenbau mittels des MLJ-Verfahrens geeignete Fügetechnik sowie an eine rechnerunterstützte Auslegung formuliert. Im Anschluss daran wird durch die enge Kopplung zwischen Fügetechnik und rechnerunterstützter Auslegung ein gemeinsames Gesamtkonzept vorgestellt.

3 Anforderungen an eine reversible Füge-technik für Funktionsprototypen

Die Anforderungen an eine Füge-technik für den Prototypenbau mittels MLJ-Verfahren gehen über die Möglichkeiten herkömmlicher Füge-techniken weit hinaus. Dies liegt darin begründet, dass die Füge-technik zusätzlich als Spanntechnik während der zweiseitigen Bauteilbearbeitung genutzt werden soll. Daher muss das Fügekonzept neben den Anforderungen an eine Füge-technik auch die Notwendigkeiten einer Spanntechnik erfüllen. Die im Folgenden beschriebenen Bedürfnisse berücksichtigen diese zusätzlichen Ansprüche. Hierbei wird bereits die Grundeigenschaft jeder Füge-technik, das Übertragen von mechanischen Belastungen, als Grundanforderung vorausgesetzt und nicht explizit aufgeführt.

Bei der Betrachtung der vielfältigen Möglichkeiten der herkömmlichen Füge-techniken liegt die Vermutung nahe, dass es auch für das MLJ-Verfahren nicht nur eine Füge-technik geben kann, welche alle Anforderungen an die jeweilige Anwendung erfüllt. Deshalb wird die Bohrung-Zapfen-Kombination nicht verworfen, sondern optimiert. Je nach Anwendung, gerade im Hinblick auf die angestrebte nicht alleinige Nutzung der Frästechnologie, kann dies dazu führen, dass die Füge-technik an ihre Grenzen stößt, was die Entwicklung einer neuen Füge-technik notwendig macht.

3.1 Mechanische Bestimmtheit

Für eine einwandfreie Funktion der Füge-technik ist es unerlässlich, dass diese in der Ausprägung ihrer Geometrie mechanisch bestimmt ist. Ist dies nicht der Fall, so kommt es bei der fertigungstechnischen Ausführung zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Nutzung als Spann-, Positionier- und Füge-technik. So führt die Bohrung-Zapfen-Kombination bei der Nutzung als Spanntechnik im Zusammenhang mit dem Opferblock zu einer mechanischen Überbestimmung, was die Nutzung stark einschränkt. Der Grund dafür wurde bereits in Kapitel 2.3.2 hinreichend diskutiert. Die gleiche Schwierigkeit ergibt sich bei der Nutzung als Füge-technik. Dies ist damit zu erklären, dass zum Fügen der Bauteilschichten das gleiche Prinzip angewandt wird, wie beim Spannen der Bauteilschichten mittels Opferblock.

Bei der Nutzung als Positioniertechnik, ergibt sich zwar der gleiche Zusammenhang, jedoch mit dem Unterschied, dass die mechanische Überbestimmung durch die Wahl einer geeigneten Spielpassung kompensiert werden kann. Diese Vorgehensweise macht das Positionieren mittels einer Bohrung-Zapfen-Kombination grundsätzlich anwendbar, jedoch ist durch das notwendige Spiel zwischen Bohrungen und Zapfen die Positioniereigenschaft als suboptimal einzustufen. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Positioniereigenschaft der Bohrung-Zapfen-Kombination für viele Anwendungen ausreichend sein kann.

3.2 Nutzung als Spanntechnik

Die Nutzung der Fügetechnik zum Spannen von Bauteilschichten bedingt das Vorhandensein einer Vorrichtung, welche die Bauteilschichten aufnehmen und während der frästechnischen Bearbeitung festhalten kann. Als Vorrichtung für die Aufnahme der Bauteilschichten mit Zapfen dient ein Maschinenschraubstock. Die Aufnahme der Bauteilschichten mit Bohrungen wird mittels eines Opferblocks durchgeführt. Im Folgenden werden sowohl die Anforderungen an die Fügetechnik als auch an die dazu notwendige Vorrichtung formuliert.

Die Spannkraft des Maschinenschraubstockes kann in Abhängigkeit vom Werkstoff zu unterschiedlich stark ausgeprägten Deformationen an den Zapfen führen. Diese sind zu vermeiden, da mit dem Auftreten von plastischen Verformungen die aufeinander abgestimmten Bohrung-Zapfen-Kombinationen unbrauchbar werden können. Aus diesem Grund müssen die Zapfen auf dem Umfang zu spannen sein, was aber zu Modifizierungen an der Vorrichtung führt.

Weiterhin ist die Lage der zu bearbeitenden Bauteilschicht im Maschinenschraubstock nicht reproduzierbar. Das liegt daran, dass diese vor dem Aufbringen der Spannkraft entlang der Spannbacken beliebig verschoben werden kann. Für eine Fräsbearbeitung ist es jedoch notwendig, dass die Position der zu bearbeitenden Bauteilschicht der Fräsmaschine durch Einmessen bekannt gemacht wird. Dies ist jedoch unter Umständen nicht möglich, wenn die Bauteilschicht über keine definierte Kontur zum Antasten und Setzen des Referenznullpunktes verfügt. Zur Lösung dieses Problems ist es sinnvoll, dass über eine spezielle Vorrichtung auf die Position der Bauteilschicht geschlossen werden kann. Dazu muss die Vorrichtung mit Referenzgeometrien ausgestattet werden, welche von dem Messtaster der Fräsmaschine angefahren werden kann.

Im Gegensatz dazu kann über das Spannen mittels Opferblock auf die Position der Bauteilschicht geschlossen werden. Durch Einmessen der Zapfen des Opferblockes kann ein Referenznullpunkt für die Bearbeitung bestimmt werden. Jedoch führt das Spannen mittels Opferblock zu einer mechanischen Überbestimmung. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Problematik der Überbestimmung beim Spannen von Bauteilschichten mit Zapfen mittels eines Maschinenschraubstockes nicht eintritt und daher ohne Schwierigkeiten anwendbar ist. Der Grund dafür ist in der Kombination von Füge-technik und Vorrichtung zu finden. Zur Vermeidung dieser Problematik sind Füge-technik und Vorrichtung so aufeinander abzustimmen, dass eine mechanische Überbestimmung nicht auftritt. Zudem ist der Verzicht eines Opferblockes anzustreben, da die individuelle Anfertigung des Opferblockes mit Zeit und Kosten verbunden ist. Die Vorrichtung muss so konzipiert sein, dass sie sich individuell an die zu spannende Bauteilschicht anpassen lässt.

3.3 Fertigungskontrolle

Der Zerspanprozess ist mit dem Vorhandensein von Graten verbunden. Schon ein einzelner unerkannter Grat in der Trennebene kann dazu führen, dass zwei Bauteilschichten nicht korrekt gefügt werden können. Da Grate nicht immer durch eine augenscheinliche Untersuchung aufgespürt und beseitigt werden können, ist eine Überprüfung des Gesamtfräsergebnisses durch eine Fertigungskontrolle unabdingbar. Eine Kontrolle beinhaltet zum einen die Überprüfung, ob sich alle Bauteilschichten korrekt aufeinander schieben lassen und beinhaltet zum anderen eine Überprüfung des Konturübergangs von Bauteilschicht zu Bauteilschicht. In beiden Fällen müssen die Bauteilschichten vorab probeweise zusammengelegt werden können. Dies wird bei der Nutzung der Bohrung-Zapfen-Kombination als Füge-technik jedoch durch das Vorhandensein des Pressverbandes verhindert.

Bleibt beispielsweise ein Grat in der Trennebene unerkannt, so kann dies zu einem Ausschuss des Prototyps führen, da durch das Zusammenschieben der Bauteilschichten automatisch der Fügeprozess eingeleitet wird, welcher als irreversibel einzustufen ist. Dies ist vor allem immer dann der Fall, wenn keine äußeren Zugkräfte zum Trennen der Pressverbindung an dem Prototyp aufgebracht werden können oder die mechanische Belastung durch den Trennprozess zur Zerstörung des Prototyps führen kann. Die Funktionsweise der Füge-technik muss deshalb so konzipiert werden, dass eine uneingeschränkte Fertigungskontrolle möglich ist.

3.4 Reversibilität

Gerade die Funktionsprototypen werden mittels Tests auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Die Auswertung der Testergebnisse kann mitunter zu Änderungen am Funktionsprototyp führen. Um eine vollständige Neuerstellung eines Prototyps zu vermeiden und damit Zeit und Kosten einzusparen, ist es sinnvoll, einzelne Bauteilschichten auszuwechseln und damit den Prototyp zu modifizieren und an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Durch die Verwendung der Bohrung-Zapfen-Kombination als Füge-technik ist dies jedoch aufgrund der meist vorliegenden Irreversibilität nicht möglich und deshalb ist häufig eine zeit- und kostenintensive Neuerstellung des Prototyps erforderlich. Für die Modifizierbarkeit von Prototypen durch den Austausch einzelner Bauteilschichten ist unbedingt eine reversible Füge-technik notwendig.

Ein weiterer Aspekt, die Füge-technik reversibel zu gestalten, liegt in der Herstellungscharakteristik des MLJ-Verfahrens selbst begründet. Das Verfahren ist durch das Herstellen einzelner Bauteilschichten sowie das anschließende Fügen dieser Schichten gekennzeichnet. Der separate Fügeprozess sowie die Nutzung der Füge-technik zum Spannen der Bauteilschichten während der Bearbeitung stellt das Verfahren in diesem Bereich vor Probleme (vgl. Kapitel 2.3.2, 2.4.1 und 2.4.2). Diese Schwierigkeiten in der Herstellungscharakteristik können aber auch zum Vorteil genutzt werden, da der aus diskreten einzelnen Bauteilschichten gefügte Funktionsprototyp auch wieder in seine diskreten Bauteilschichten zerlegt werden kann. Durch diese Möglichkeit unterscheidet sich das MLJ-Verfahren grundsätzlich von den klassischen generativen RP-Verfahren, wodurch es sich bestens für modular aufzubauende Prototypen eignet [5].

3.5 Anwendungsbereich

Die Herstellung von Prototypen erfordert auch die Berücksichtigung von Anforderungen an deren Funktion. Somit bestimmt der Prototyp letztendlich die Füge-technik sowie das Herstellungsverfahren selbst. Das MLJ-Verfahren nutzt bisher zur Fertigung nur das Fräsverfahren sowie die Bohrung-Zapfen-Kombination als Füge-technik. In der Praxis treten jedoch Prototypen auf, welche in eine Fräs- und Drehbearbeitung unterteilt werden müssen. Der Grund für eine Kombination beider Fertigungsverfahren kann in den für eine korrekte Funktion des Prototyps erforderlichen Maß-, Form- und Oberflächengenauigkeiten zu finden sein, welche unter Umständen durch eine alleinige Nutzung des Fräsverfahrens nicht gewährleistet werden können. Ein anderer Grund kann in der Geometrie des Prototyps liegen, die eine komplette

Fertigung mittels Fräsen nicht zulässt oder äußerst schwierig gestalten würde. Während mit der Fräsbearbeitung praktisch beliebige Konturen hergestellt werden können, ermöglicht die Drehbearbeitung die Herstellung von hochgenauen Rotationskörpern. Als Beispiel für einen Prototyp, welcher für ein optimales Fertigungsergebnis in eine Fräs- und Drehbearbeitung aufgeteilt werden sollte, sei eine Kurbelwelle genannt.

Die Anforderung, die Fügetechnik auch als Spanntechnik während der Bearbeitung nutzen zu können, soll sowohl für die Fräs- als auch für die Drehbearbeitung möglich sein. Dies erfordert eine fräs-dreh-kompatible Fügetechnik, die es gestattet, die einzelnen Bauteilsegmente sowohl in einer Fräs- als auch in einer Drehmaschine aufzunehmen und zu bearbeiten. Dazu ist es notwendig, dass die Fügetechnik spezielle Eigenschaften im Hinblick auf ihre Nutzung als Spanntechnik gewährleistet. Diese lassen sich aus der Drehbearbeitung selbst ableiten, bei der Bauteile zentrisch zur Drehachse einzuspannen sind.

Die Verwendung der Bohrung-Zapfen-Kombination kommt hierbei aufgrund der mechanischen Überbestimmung nicht in Frage. Das liegt zum einen daran, dass die Position der Bohrungen und Zapfen der Positioniergenauigkeit der Fräsmaschine unterliegen und bei der Aufnahme in eine Drehmaschine mit einem nicht zentrisch zur Drehachse liegendem Bauteilsegment zu rechnen ist. Zum anderen ist die Positioniereigenschaft der Bohrung-Zapfen-Kombination durch die Wahl einer Spielpassung suboptimal, so dass auch in diesem Fall nicht von einem zentrisch zur Drehachse liegendem Bauteilsegment ausgegangen werden kann. Für die Nutzung als Spanntechnik in einer Drehmaschine ist das Vorhandensein einer mechanisch bestimmten sowie zentrisch positionierenden Fügetechnik notwendig.

4 Anforderungen an eine rechnerunterstützte Auslegung

Ausgehend von den beschriebenen Defiziten in der datentechnischen Ausführung von Prototypen werden in diesem Kapitel die Anforderungen an ein Programm zur rechnerunterstützten Auslegung von Fügetechniken formuliert. Dabei richten sich die Anforderungen nicht nur an die eigentliche Funktionalität, sondern auch an die Benutzerfreundlichkeit und an die Struktur des Programms. Da gerade die funktionalen Anforderungen im hohen Maße abhängig von der auszulegenden Fügetechnik sind, werden diese allgemeingültig beschrieben.

4.1 Funktionalität

Ein weit verbreiteter Aufbau von Computerprogrammen erfolgt auf Grund des so genannten EVA-Prinzips (**E**ingabe-**V**erarbeitung-**A**usgabe). Dabei werden die Daten nach der Eingabe durch einen Benutzer über einen vorgegebenen Algorithmus verarbeitet und als Ergebnisdaten wieder ausgegeben [9]. Somit lassen sich funktionale Anforderungen an die

- **E**ingabe,
- **V**erarbeitung und
- **A**usgabe

des benötigten Programms formulieren.

4.1.1 Eingabe

Im Mittelpunkt der rechnerunterstützten Auslegung steht die Festigkeitsberechnung. Für ihre Durchführung ist es erforderlich, dass alle dazu notwendigen Daten dem Berechnungsalgorithmus durch eine Eingabe eines Benutzers zugeführt werden können. Die Festigkeitsberechnung ist im Wesentlichen von folgenden drei Parametern abhängig [10]:

- äußere Belastung (Kräfte und Momente)
- Gestalt (Form und Abmessung)
- Werkstoff (Werkstoffkennwerte)

Zur Erzielung eines optimalen Ergebnisses ist es erforderlich, dass diese Parameter zur Beeinflussung der Festigkeitsberechnung vom Benutzer nicht nur eingegeben, sondern auch variiert werden können. In dem hier vorliegenden konkreten Anwendungsfall reduziert sich jedoch die Eingabe für die äußere Belastung auf die Größe der einwirkenden Kraft oder des Momentes und für die Gestalt lediglich auf die Abmessungen der Fügeelemente.

4.1.2 Verarbeitung

Die über die Eingabe gewonnenen Daten werden in der Verarbeitung dem dort hinterlegten Algorithmus zur Festigkeitsberechnung zugeführt. Für eine sichere Verarbeitung ist es unbedingt erforderlich, dass der Berechnungsalgorithmus vollständig und korrekt abgebildet wird. Da dieser abhängig von der zu berechnenden Fügetechnik ist, wird an dieser Stelle die Individualität der funktionalen Anforderungen deutlich, insbesondere die der Eingabe und der Verarbeitung. Die Festigkeitsberechnung lässt sich für statisch belastete Bauteile jedoch allgemeingültig wie folgt ausdrücken [10]:

$$\text{Sicherheit} = \frac{\text{Werkstoffkennwert}}{\text{wirksame Spannung}}. \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Als Werkstoffkennwert wird beispielsweise die Streckgrenze R_e oder die Zugfestigkeit R_m eingesetzt. Die wirksame Spannung

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gl. 4-2})$$

bei Zug- bzw. Druckbeanspruchung ist das Verhältnis von Kraft zu Fläche, wobei die Kraft durch die Eingabe der äußeren Belastung angegeben und die Fläche aus der Gestalt bzw. der Form und den Abmessungen berechnet wird. Für eine korrekte Festigkeitsberechnung muss unbedingt die allgemein gültige Struktur eingehalten werden.

4.1.3 Ausgabe

Als Ergebnis der Festigkeitsberechnung wird ein Sicherheitsfaktor in Form einer dimensionslosen Zahl ausgegeben. Da der Benutzer die Ausgabe der Festigkeitsberechnung beurteilen muss, sollte diese neben einer Visualisierung auch eine Interpretationshilfe des Ergebnisses beinhalten. Die Interpretationshilfe soll den Benutzer automatisch vor einer nicht ausreichenden Festigkeit der Füge-technik in Kenntnis setzen bzw. warnen. Dazu ist es erforderlich, dass eine Klassifizierung des Sicherheitsfaktors vorgenommen wird. Grundsätzlich kann dieser die folgenden zwei Werte annehmen:

- *Sicherheit* ≤ 1
- *Sicherheit* > 1

Liegt beispielsweise das Ergebnis bei einer *Sicherheit* ≤ 1 , so würde die Interpretationshilfe den Benutzer automatisch visuell als auch akustisch über die nicht ausreichende bzw. einfache Sicherheit der Füge-technik informieren. Dieser Hinweis hat unmittelbar eine neue Dimensionierung der Füge-technik und/oder die Wahl eines anderen Werkstoffes zur Folge. Liegt die Sicherheit dagegen über 1, so ist theoretisch für eine ausreichende Festigkeit gesorgt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Benutzer über die Höhe der Sicherheit individuell zu entscheiden hat.

4.2 Benutzerfreundlichkeit

Zum Erreichen einer optimalen Benutzerfreundlichkeit werden eine den vorliegenden Aufgaben gerechte einfache Bedienung des Programms und eine erhöhte Stabilität gegenüber möglichen Benutzerfehlern angestrebt. Um dies zu gewährleisten, müssen die folgenden Anforderungen berücksichtigt werden:

- Bereitstellung einer Benutzeroberfläche
- Integration in die CAD-Umgebung
- Fehlertoleranz

Die Benutzeroberfläche muss nicht nur eine einfache Bedienung gewährleisten, sondern der Aufbau der Benutzeroberfläche muss äußerst übersichtlich gestaltet und dessen Inhalt passend zur Aufgabe sein. Zur Unterstützung des Verständnisses kann es erforderlich sein, den Inhalt der Oberfläche um Informationsskizzen zu ergänzen. Gerade in Hinsicht auf die Eingabe von Maßen für das Dimensionieren der Fügetechnik ist es notwendig, deren Bedeutung zu kennen.

Die Integration des Programms in die CAD-Umgebung hat für den Benutzer mehrere Vorteile, welche sich auch direkt auf die Benutzerfreundlichkeit auswirken. So kann die Auslegung der Fügetechnik unmittelbar in der CAD-Umgebung erfolgen, ohne dass das CAD-System verlassen werden muss. Dies bedeutet zum einen ein Zeitersparnis und zum anderen können die Strukturen und Funktionalitäten der CAD-Software besser genutzt werden. Auf diese Weise ist es problemlos möglich, die Geometriedaten aus der rechnerunterstützten Auslegung auf das CAD-Modell der Fügetechnik zu referenzieren und damit erübrigt sich eine manuelle Anpassung an die ermittelten Geometrie-Daten.

Um die Stabilität des Programms gegenüber den Eingabebefehlen des Benutzers sicherzustellen, muss das Programm über eine Fehlertoleranz verfügen. Eine erste Möglichkeit für eine derartige Umsetzung ist die Nutzung einer Plausibilitätskontrolle, indem Eingabefehler wie beispielsweise Innendurchmesser $>$ Außendurchmesser bei einem kreiszylindrischen Hohlrohr verhindert bzw. abgefangen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Eliminierung von Fehleingaben durch eine weitgehende Verwendung von Auswahlfeldern statt Texteingabefeldern [9] [11].

4.3 Wartbarkeit

Für den Anwender spielt die Wartbarkeit eines Programms keine direkte Rolle. Für die Weiterentwicklung dagegen ist sie jedoch von besonderem Interesse, da mit einer Wartung nicht nur Zeit und Kosten gespart werden, sondern auch die jeweils aktuellen Technologien in das Programm eingebunden werden können [9] [11]. An die Wartbarkeit lassen sich die folgenden Anforderungen formulieren:

- Aufsuchen und Beheben von Fehlern in möglichst kurzer Zeit
- Verbesserungs- und Anpassungsmöglichkeit von Funktionalitäten
- Erweiterbarkeit um zusätzliche Fügetechniken

Die Anforderungen üben dabei wiederum großen Einfluss aus auf die Struktur des Programms, deshalb muss die Struktur für eine Erweiterung klar gegliedert und nachvollziehbar definiert sein. Problemorientierte Programmiersprachen wie Visual Basic oder C++ bieten die Möglichkeit, das Programm in überschaubare, klar von einander abgegrenzte Unterprogramme zu zerlegen (Modularitätsprinzip) [9]. Aus diesem Grunde wird für die Entwicklung der Software-Erweiterung die Programmiersprache Visual Basic gewählt.

5 Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von reversiblen Füge Techniken für Funktionsprototypen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Stand der Technik des MLJ-Verfahrens beschrieben und bewertet. Ausgehend von den Defiziten wurden Anforderungen an eine reversible Füge Technik sowie an eine rechnerunterstützte Auslegung formuliert. Im Folgenden wird nun ein Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von reversiblen Füge Techniken für Funktionsprototypen entwickelt. Dazu wird als erstes die Architektur des Gesamtkonzeptes vorgestellt, als zweites die reversiblen Füge Techniken für Funktionsprototypen und abschließend das Programm zur rechnerunterstützten Auslegung von Funktionsprototypen.

5.1 Architektur des Gesamtkonzeptes

Die **Abbildung 5-1** zeigt die Architektur des Gesamtkonzeptes, eingebettet in die bereits in Kapitel 2 vorgestellte datentechnische und fertigungstechnische Ausführung zur Herstellung von Prototypen. Die zum Gesamtkonzept gehörenden Bereiche sind farblich rot gekennzeichnet und entsprechend dem chronologischen Verlauf zur Herstellung von Prototypen eingeordnet. Diese sind im Einzelnen

- die wissenschaftliche Ausführung,
- die rechnerunterstützte Auslegung mit einer dazugehörigen Knowledge Base,
- die Fertigungsmittelauswahl,
- die Fertigungskontrolle und
- das reversible Verbinden von Bauteilschichten.

Grundlage der Prototypenherstellung und damit des Konzeptes sind die wissenschaftlich ausgearbeiteten Fügekonzepte, welche speziell auf die Bedürfnisse des MLJ-Verfahrens abgestimmt sind. Sie ermöglichen eine korrekte datentechnische und eine korrekte fertigungstechnische Ausführung unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen. Ergänzend dazu wird die Prototypenherstellung um die wissenschaftliche Ausführung erweitert, welche als Informationsträger für den gesamten Herstellungsprozess dient.

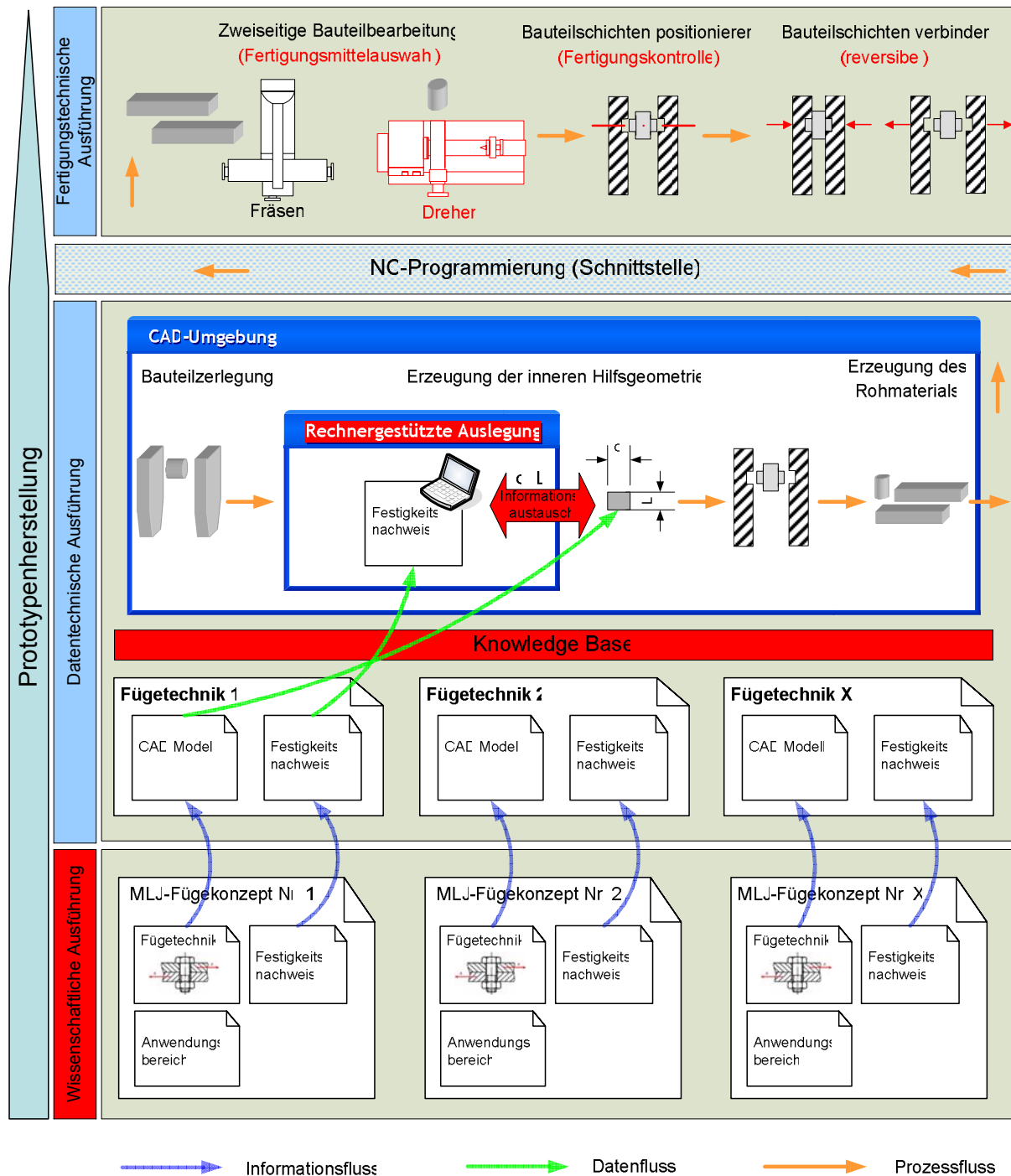


Abbildung 5-1: Architektur des Gesamtkonzeptes

Die Erzeugung der inneren Hilfsgeometrie der datentechnischen Ausführung wird um die rechnerunterstützte Auslegung ergänzt. Die Nutzung der rechnerunterstützten Auslegung erfolgt unmittelbar in der CAD-Umgebung. Für die Auslegung ist es erforderlich, die Geometrie und den Festigkeitsnachweis der jeweiligen Füge-technik zu kennen. Dazu werden die in der wissenschaftlichen Ausführung hinterlegten Informationen in eine Knowledge Base überführt.

Die Überführung beinhaltet die datentechnische Umsetzung der Füge-technikgeometrie in ein CAD-Modell und die des Festigkeitsnachweises in Form eines Berechnungsalgorithmus. Bei der Auswahl einer Füge-technik aus der Knowledge Base wird auf den dazugehörigen Festigkeitsnachweis und auf das dazugehörige CAD-Modell zugegriffen. Eine Kopplung zwischen beiden ermöglicht einen Informationsaustausch, bei dem Geometriedaten ausgetauscht werden. Das hat zur Folge, dass zusätzlich zur rechnerunterstützten Auslegung die Ergebnisse des Festigkeitsnachweises automatisch auf das CAD-Modell referenziert werden können, wodurch der Grad der Automatisierung nochmals gesteigert wird.

Die fertigungstechnische Ausführung wird in den Bereichen

- zweiseitige Bauteilbearbeitung,
- Bauteilschichten positionieren und
- Bauteilschichten verbinden

modifiziert bzw. erweitert. Dabei sollen die Bereiche „Bauteilschichten positionieren“ und „Bauteilschichten verbinden“ für jede MLJ-Fügetechnik den neuen Anforderungen einer Fertigungskontrolle sowie dem reversiblen Verbinden von Bauteilschichten gerecht werden. Der Bereich der zweiseitigen Bauteilbearbeitung wird dagegen nur für speziell erarbeitete MLJ-Fügekonzeppte die Möglichkeit einer Fertigungsmittelauswahl bieten. Der Grund dafür ist, dass die Notwendigkeit einer Fertigungsmittelauswahl vom jeweiligen Prototypen bzw. dessen Geometrie abhängt und deshalb nicht immer erforderlich ist.

5.2 Reversible Füge-techniken für Funktionsprototypen

Im Folgenden wird ein reversibles Fügekonzept vorgeschlagen, welches durch zwei Füge-stufen gekennzeichnet ist. In der ersten Stufe liegt ein Anschauungsprototyp vor, an dem eine umfassende Fertigungskontrolle durchgeführt werden kann. So ist es z.B. möglich, den Konturübergang sowie den Sitz der Bauteilschichten zu kontrollieren. Die innere Hilfsgeometrie dient durch den vollständigen Entzug der sechs Freiheitsgrade zum Positionieren der Bauteilschichten untereinander. In der zweiten und letzten Stufe wird der Anschauungsprototyp

durch eine gezielte äußere Einbringung einer Normalkraft F_N in einen Funktionsprototyp umgewandelt.

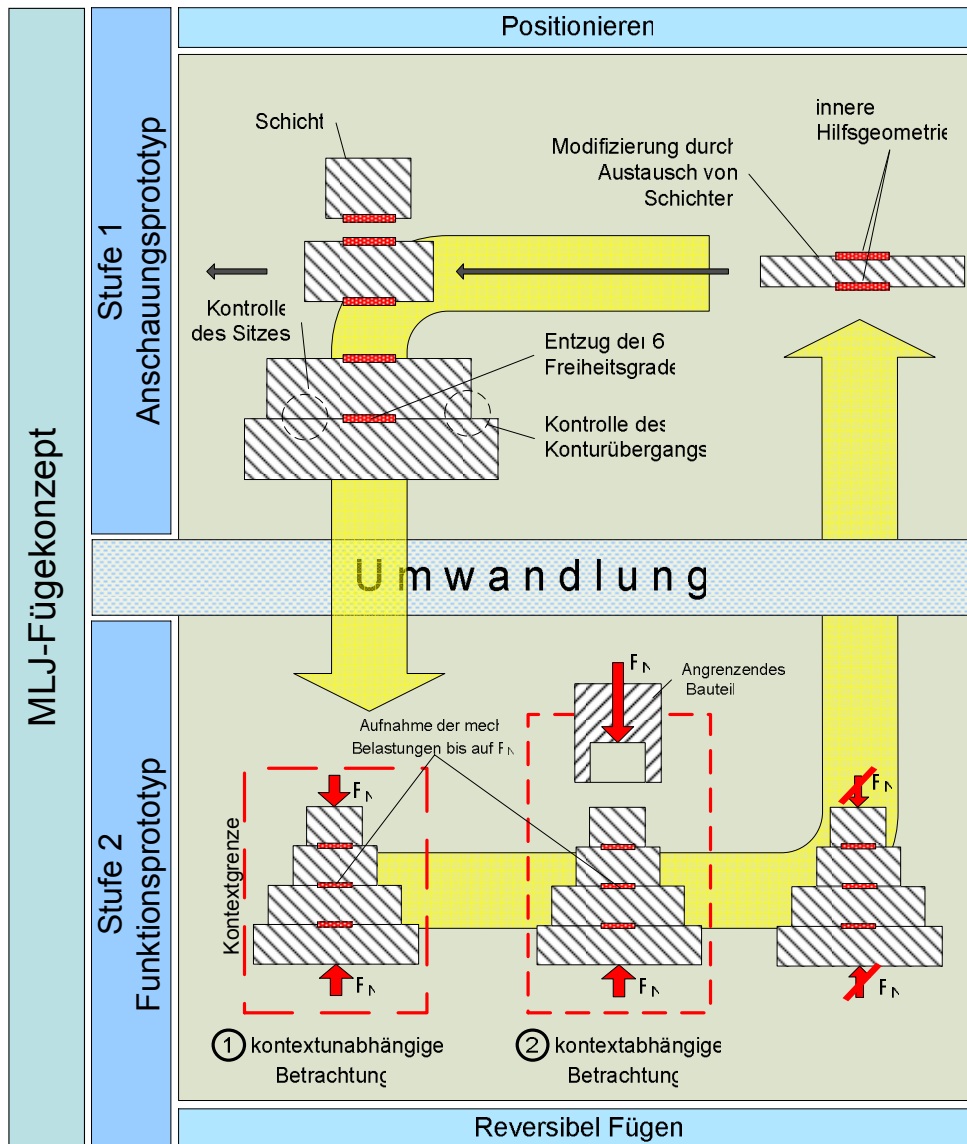


Abbildung 5-2: MLJ-Fügekonzept

Diese Umwandlung ist umkehrbar, so dass der Prototyp durch Austausch einzelner Bauteilschichten modifiziert werden kann. Die innere Hilfsgeometrie sorgt in dieser Stufe neben dem Entzug der Freiheitsgrade auch für die Aufnahme der mechanischen Belastungen mit Ausnahme der Normalkraft F_N . Diese kann sowohl kontextunabhängig als auch kontextabhängig aufgebracht werden. Beim kontextabhängigen Fügen der Bauteilschichten vereinfacht sich der Füge- sowie Trennprozess der Bauteilschichten erheblich (vgl. **Abbildung 5-2**).

Die Nutzung der inneren Hilfsgeometrie sowohl als Füge- als auch als Spanntechnik während der Herstellung der Bauteilschichten stellt eine Schnittstelle zwischen beiden Techniken dar. Dieser Umstand führt dazu, dass bei der Entwicklung des reversiblen Fügekonzeptes die spätere Nutzung als Spanntechnik berücksichtigt werden muss. Wie sich später zeigen wird, beinhaltet die enge Verzahnung zwischen der Füge- und der Spanntechnik, welche im weiteren Verlauf auf eine Vorrichtung ausgedehnt wird, die Möglichkeit, vorhandene Querbeziehungen für die Entwicklung eines Fügekonzeptes zu nutzen. Unter Berücksichtigung dieser Merkmale stützt sich die Herleitung des Fügekonzeptes auf

- die räumliche Trennung von Füge- und Positioniertechnik,
- die Aufhebung der funktionalen Trennung zwischen Füge- und Positioniertechnik und
- das kontextunabhängige und – abhängige Fügen,

welche im Folgenden zur Erläuterung dienen werden.

Bei der in Kapitel 2 vorgestellten Bohrung-Zapfen-Kombination stellt sich vor allem die geforderte Reversibilität der Verbindung als problematisch dar. Grund dafür ist, dass es sich dabei um eine kombinierte Positionier- und Füge-technik handelt, welche im Inneren des Prototyps bzw. zwischen den Bauteilschichten angeordnet und nach dem Fügevorgang von außen nicht mehr zugänglich bzw. lösbar ist, weshalb sie als irreversibel einzustufen ist. Die Möglichkeit des reversiblen Fügens hat jedoch direkten Einfluss auf die Forderungen nach einer Fertigungskontrolle und der Austauschbarkeit von Bauteilschichten (modularer Aufbau).

Zur Lösung des Problems wird eine räumliche Trennung der kombinierten Positionier- und Füge-technik angestrebt. Die räumliche Trennung bietet die Möglichkeit, dass die Anordnung der Füge-technik so vorgenommen werden kann, dass sie von außen zugänglich bzw. lösbar ist. Mit der räumlichen Trennung geht automatisch eine funktionale Trennung einher. So sorgt die Positioniertechnik für den Entzug der 6 Freiheitsgrade und die Füge-technik für die Verbindung der Bauteilschichten sowie für die Übertragung der mechanischen Belastungen. Die funktionale Trennung kann jedoch aufgehoben werden, so dass die Positioniertechnik bei einer ausreichenden Dimensionierung einen Großteil der mechanischen Belastungen aufnehmen kann. Die funktionale Trennung kann soweit führen, dass die Füge-technik nur noch für den Zusammenhalt der Bauteilschichten verantwortlich ist.

Bei der Betrachtung der bereits erwähnten engen Verzahnung zwischen Füge- und Spanntechnik lassen sich Querbeziehungen aufzeigen, welche für die Entwicklung des Konzeptes herangezogen werden können. Die **Abbildung 5-3** zeigt in Analogie zum Fügekonzept das dazu passende bzw. notwendige Vorrichtungskonzept.

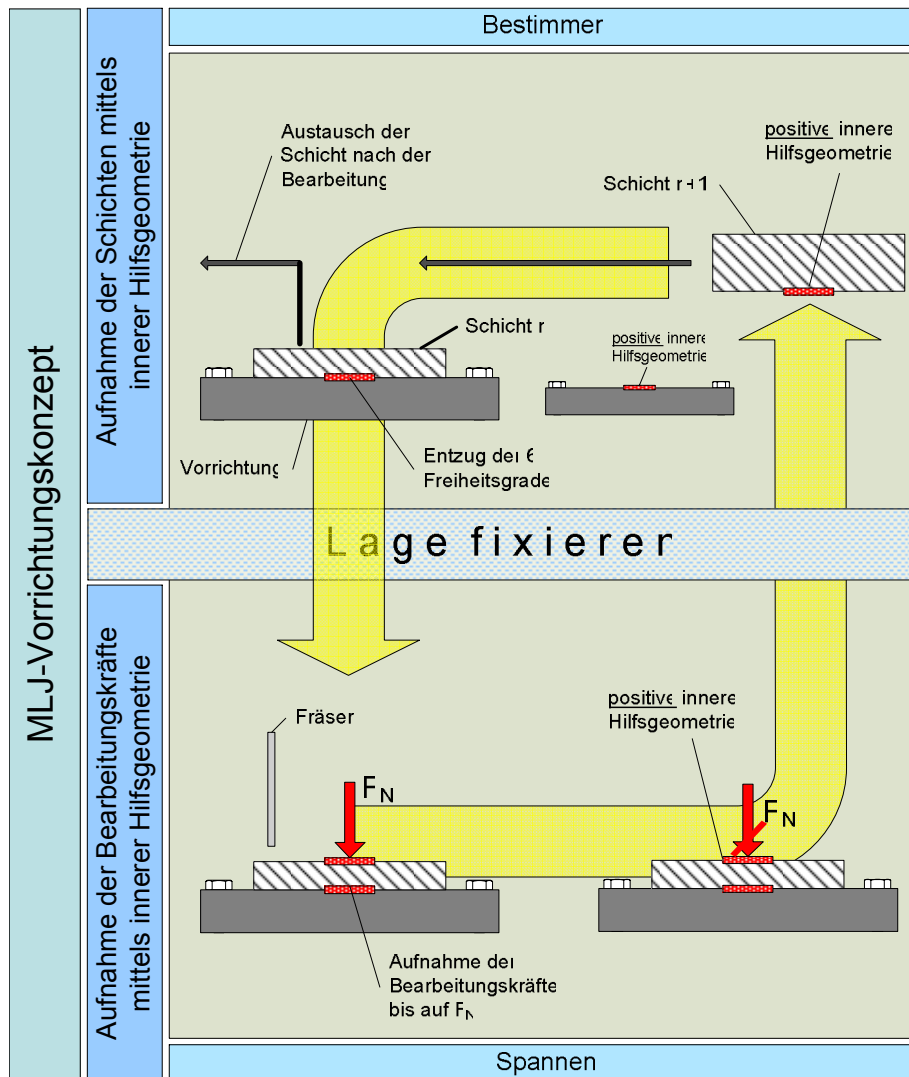


Abbildung 5-3: MLJ-Vorrichtungskonzept

Mittelpunkt des Vorrichtungskonzeptes ist auch hier die innere Hilfsgeometrie. Die Vorrichtung erfüllt die Funktion zur Aufnahme der Bauteilschicht und das Festhalten der Schichten während der Bearbeitung. In Anlehnung an den Vorrichtungsbau wird das Aufnehmen des Bauteils als Bestimmen bezeichnet, bei welchem dem Werkstück alle sechs Freiheitsgrade für ein reproduzierbares Aufnehmen in die Vorrichtung entzogen werden müssen. Das nachfolgende Festhalten der Bauteilschicht während der Bearbeitung wird als Spannen bezeichnet. Beim Spannen wird die definierte Lage der Bauteilschicht fixiert, so dass eine Bearbeitung ohne

Verrutschen möglich ist. Durch das Aufheben der Spannkraft kann nach der Bearbeitung der Bauteilschicht diese durch eine noch unbearbeitete Schicht ausgetauscht werden. Wird die innere Hilfsgeometrie ausreichend dimensioniert, kann diese die Bearbeitungskräfte aufnehmen und die Spannkraft wird lediglich auf das Aufnehmen der Normalkraft F_N reduziert.

Die räumliche und funktionale Trennung des Bestimmens und Spannens unter dem Gesichtspunkt der Entwicklung eines Vorrichtungskonzeptes erfüllt bei genauerer Analyse den Charakter eines temporären reversiblen Fügeprozesses. Durch die enge Verzahnung zwischen Füge- und Vorrichtungskonzept ist es daher möglich, von einem Konzept auf das andere und umgekehrt zu schließen. So kann z. B. der gesamte Erfahrungsschatz im Vorrichtungsbau bei der Konstruktion der inneren Hilfsgeometrie dahingehend helfen, dass bereits bekannte Bestimmungselemente wie z.B. Prismen für den systematischen und reproduzierbaren Entzug von Freiheitsgraden verwendet werden. Die entwickelte Hilfsgeometrie im Vorrichtungskonzept bildet dann im Fügekonzept automatisch die Positioniertechnik. Die **Abbildung 5-4** verdeutlicht durch eine Gegenüberstellung beider Konzepte die vorhandenen Analogien.

Das Aufbringen der Normalkraft F_N zum Verbinden der Bauteilschichten kann sowohl kontextunabhängig als auch –abhängig erfolgen. Diese Möglichkeit ist vor allem dann von großem Nutzen, wenn das Einsatzumfeld des Funktionsprototyps berücksichtigt wird. Bei der Betrachtung der Bohrung-Zapfen-Kombination wird deutlich, dass sie sich nur auf den zu fügenden Prototyp bezieht und das spätere Einsatzumfeld dabei völlig unberücksichtigt bleibt. Die Bohrung-Zapfen-Kombination ist in diesem Zusammenhang als kontextunabhängige Füge-technik anzusehen. Dies führt dazu, dass bei dieser Art der Betrachtung die Prototypen grundsätzlich über eine eigene Füge-technik zum Verbinden der Bauteilschichten verfügen müssen. Funktionsprototypen werden jedoch in den seltensten Fällen in der Erprobung allein stehend untersucht. Sie sind vielmehr Teil eines ganzen Systems, in welchem sie mittels Füge-techniken mit anderen angrenzenden Bauteilen verbunden sind.

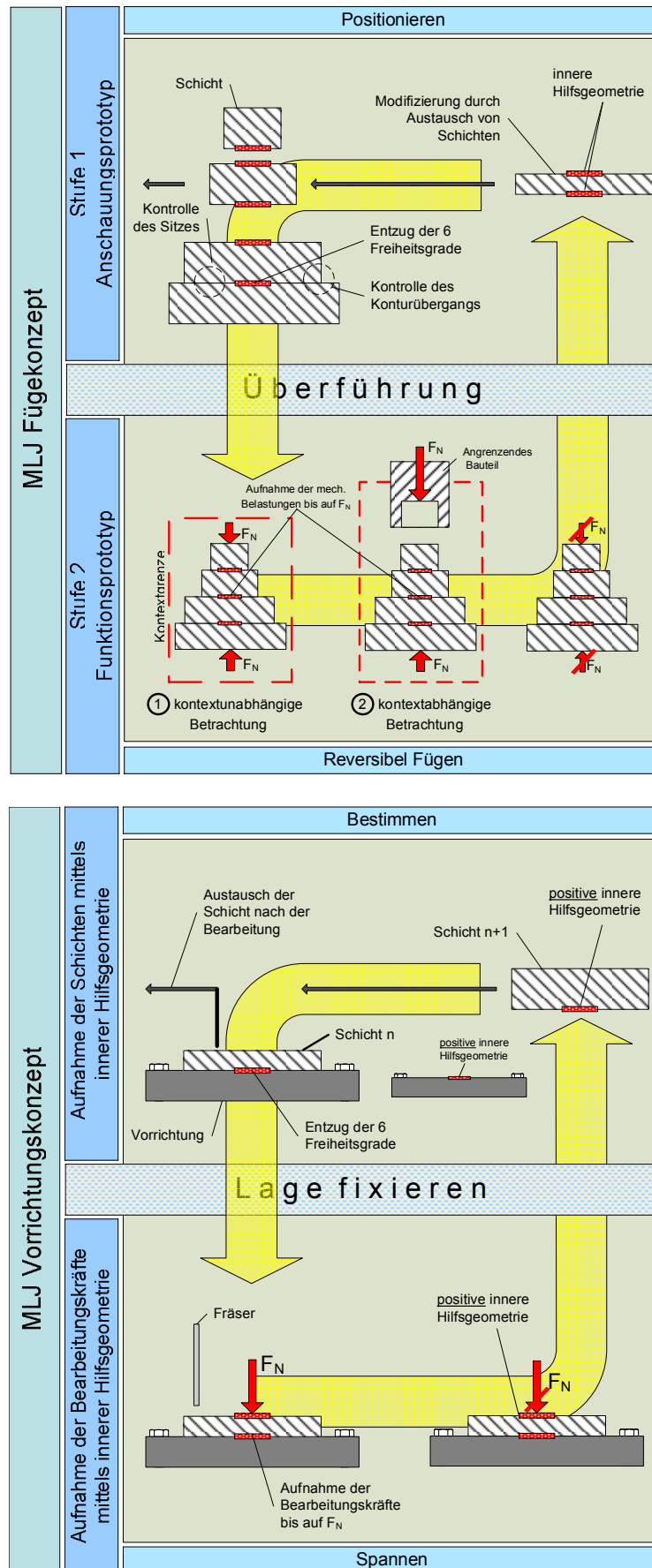


Abbildung 5-4: Bestehende Analogien zwischen dem Füge- und Vorrichtungskonzept

Betrachtet man einen Prototypen bereits vor seiner Fertigung im Gesamtkontext des späteren Einsatzumfeldes, so ist es möglich, die ohnehin eingesetzte Füge-technik für die Verbindung mit einem angrenzenden Bauteil auch zum Fügen des Prototyps bzw. zur Aufnahme der Normalkraft F_N zu nutzen. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden als kontextabhängiges Fügen bezeichnet. Die **Abbildung 5-5** verdeutlicht das Prinzip beider Betrachtungsweisen in Abhängigkeit von der Systemgrenze.

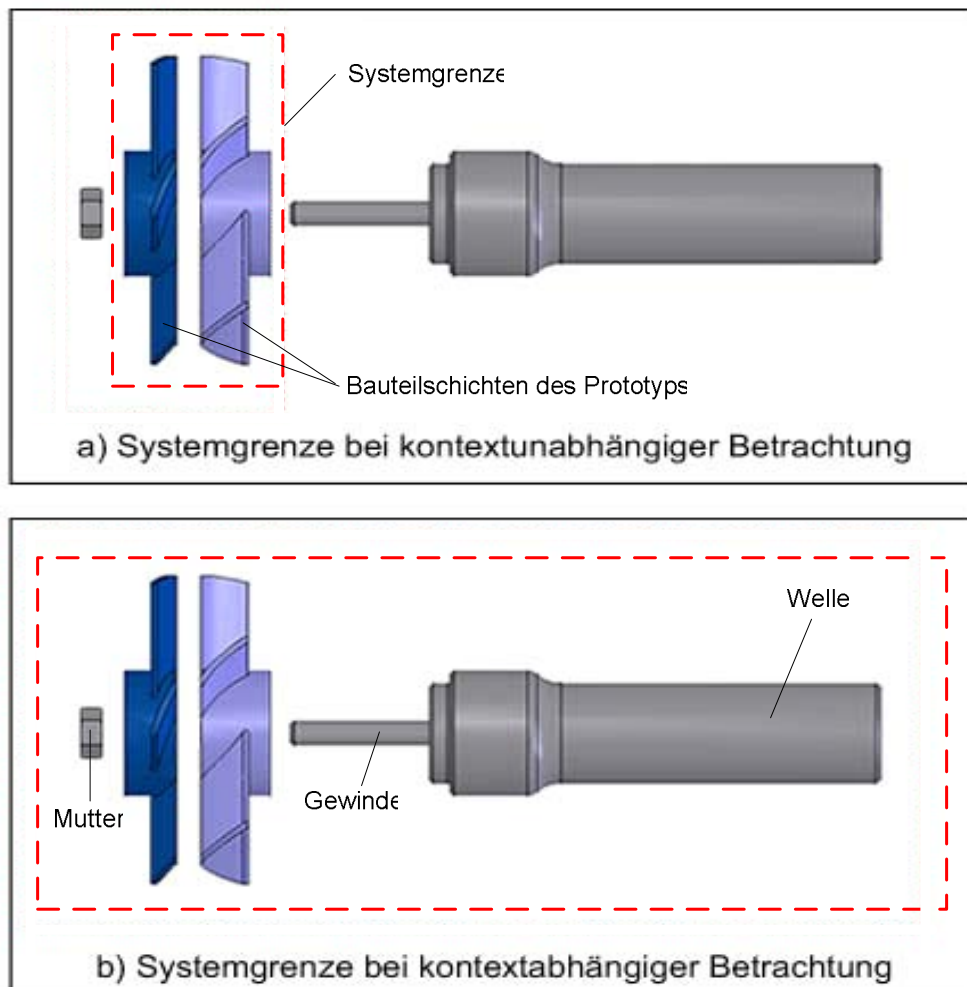


Abbildung 5-5: kontextunabhängige und -abhängige Betrachtungsweise

Das entwickelte MLJ-Fügekonzept wird im weiteren Verlauf der Arbeit zum einen an der in Kapitel 2 vorgestellten Bohrung-Zapfen-Kombination und zum anderen an einer neuen Füge-technik vorgeführt, welche in ihrer Gestalt der Hirth-Stirnverzahnung ähnelt. Die erwähnte Abhängigkeit zwischen Füge-technik und Vorrichtung bedingt neben den technischen Ausführungen der reversiblen Füge-techniken auch die Entwicklung von Vorrichtungen.

5.2.1 Bohrung-Zapfen-Kombination

Für eine bessere Nutzung der in Kapitel 2 vorgestellten Bohrung-Zapfen-Kombination wird diese den in Kapitel 3 formulierten Anforderungen durch Anwendung des MLJ-Fügekonzeptes angepasst. Dabei soll die Geometrie der Bohrung-Zapfen-Kombination erhalten bleiben, da diese einen Vorteil in der fertigungstechnischen Herstellung darstellt. Der Vorteil besteht darin, dass es sich dabei um Regelgeometrien handelt, welche sich durch eine einfache und schnelle frästechnische Herstellung auszeichnen. Dieser Sachverhalt wird insbesondere bei der Fertigung von Bohrungen deutlich, welche zudem hochgenau mittels Reiben hergestellt werden können.

Im Folgenden beinhaltet die Umsetzung des MLJ-Fügekonzeptes die Erstellung einer reversiblen Füge-technik auf der Basis der Bohrung-Zapfen-Kombination unter Berücksichtigung der kontextunabhängigen bzw. –abhängigen Betrachtungsweise. Im Anschluss daran folgt eine Festigkeitsbetrachtung der Bohrung-Zapfen-Kombination und abschließend wird die Entwicklung einer Vorrichtung zur Aufnahme von Schichten mit Zapfen beschrieben, so dass diese als Spanntechnik während der frästechnischen Bauteilbearbeitung genutzt werden kann. Auf eine Vorrichtung zum Aufnehmen und Spannen von Schichten, welche nur Bohrungen besitzen, wird verzichtet. Der Grund dafür liegt einerseits darin, dass das Spannen von Bohrungen als problematisch einzustufen ist und andererseits würde dies nur die Anfangs- oder Endschicht betreffen. Daher werden bei einer zweiseitigen Bauteilbearbeitung die vorhandenen Bohrungen bei einer der beiden Schichten zusätzlich um ein Zapfenpaar ergänzt, auf dem dann gespannt werden kann. Da dieses zusätzliche Zapfenpaar das Fügen der Schichten verhindert, ist es nach der Fertigung wieder zu entfernen. Um diesen Arbeitsschritt im Sinne einer schnellen Prototypenfertigung einzusparen, kann stattdessen die Fläche der gegenüberliegenden Schicht zusätzlich zu den Zapfen mit einem Bohrungspaar versehen werden, wodurch die Kompatibilität beider Schichten wieder hergestellt wird.

5.2.1.1 Füge-technik

Die Anpassung der Bohrung-Zapfen-Kombination an das MLJ-Fügekonzept stützt sich auf

- die räumliche Trennung von Füge- und Positioniertechnik,
- die Aufhebung der funktionalen Trennung zwischen Füge- und Positioniertechnik und
- das kontextunabhängige und –abhängige Fügen.

Diese Aspekte sollen im Folgenden schrittweise erläutert werden.

Die räumliche Trennung von Füge- und Positioniertechnik bietet die Möglichkeit, die Füge- und Positioniertechnik so zu platzieren, dass sie von außen zugänglich ist. Die Bohrung-Zapfen-Kombination fügt und positioniert durch ihre Geometrie gleichzeitig. Durch ihre Anordnung in den Trennebenen der Bauteilschichten ist sie nach dem Fügen von außen nicht mehr zugänglich, was die geforderte Reversibilität behindert. Zu diesem Zweck erfolgt die Auslegung der Bohrung-Zapfen-Kombination nur noch als Spielpassung. Eine Aufnahme der Normalkraft F_n ist somit nicht mehr möglich. Dadurch wird auch die Forderung nach einer umfassenden Fertigungskontrolle erfüllt, da die Spielpassung ein probeweises Zusammenlegen der Bauteilschichten gestattet. In diesem Stadium fungiert die Bohrung-Zapfen-Kombination lediglich als Positioniertechnik. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Güte der Positionierung von der Wahl der Spielpassung abhängig ist. Diese sollte unter Berücksichtigung der Arbeitsgenauigkeit der Fräsmaschine so eng wie möglich sein.

Die Aufhebung der funktionalen Trennung zwischen Füge- und Positioniertechnik wird im Hinblick auf die Nutzung der Bohrung-Zapfen-Kombination als Spanntechnik während der Bauteilbearbeitung durchgeführt. Die im ersten Schritt auf eine Positioniertechnik zurückgeführte Bohrung-Zapfen-Kombination muss dazu während der Bauteilbearbeitung die auftretenden Zerspankräfte aufnehmen können. Um dies zu gewährleisten, muss eine Dimensionierung der Bohrung-Zapfen-Kombination anhand der Zerspankräfte erfolgen. Durch diese Maßnahme erweitert sich die Funktionalität der Bohrung-Zapfen-Kombination dahingehend, dass sie mechanische Belastungen aufnehmen kann. Durch diese Fähigkeit ist sie in der Lage, einen Großteil der Aufgaben einer Füge- und Positioniertechnik wahrzunehmen, wodurch die Positioniertechnik den Charakter einer Füge- und Positioniertechnik erhält (funktionale Trennung). Lediglich die Aufnahme der Normalkraft F_n während der Bauteilbearbeitung wird durch die Vorrichtung realisiert, welche speziell auf die Bohrung-Zapfen-Kombination unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Kapitel 3 abzustimmen ist.

Das kontextunabhängige und -abhängige Fügen dient zum gezielten Aufbringen der Normalkraft F_n , welche den Zusammenhalt der einzelnen Bauteilschichten untereinander gewährleistet. Während beim kontextabhängigen Fügen die Füge- und Positioniertechnik bereits vorliegt, so kann sie bei der kontextunabhängigen Betrachtungsweise praktisch frei gewählt werden. Um der Forderung nach einer Modifizierbarkeit des Prototyps durch Austausch einzelner Schichten gerecht zu werden, muss diese von außen zugänglich und grundsätzlich reversibel sein, was die freie Auswahl wiederum einschränkt. Als Beispiel hierfür sei ein zentraler Pressverband genannt,

der in der gezeigten **Abbildung 5-6** von außen zugänglich und durch Ausbohren oder Durchdrücken der Übermaßhülse grundsätzlich reversibel ist.

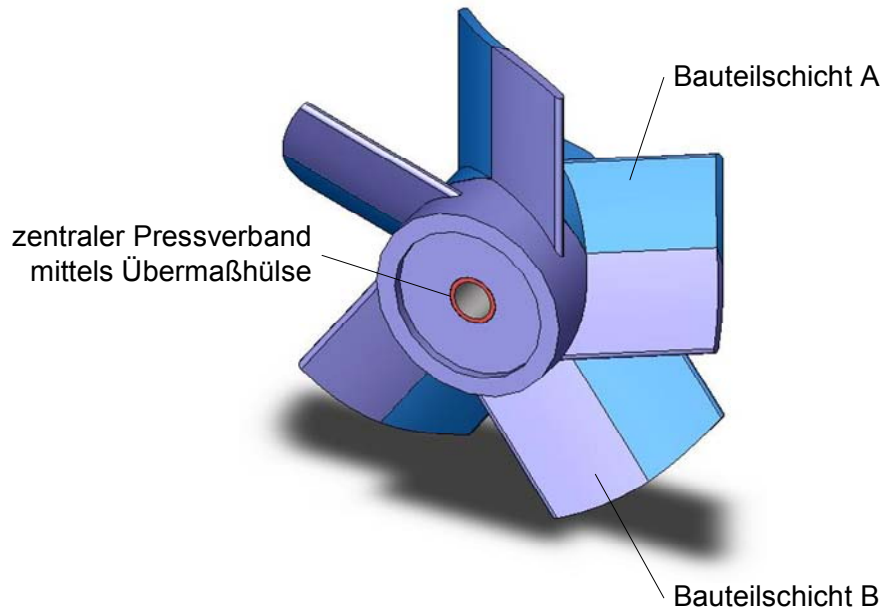


Abbildung 5-6: Zentraler Pressverband zum kontextunabhängigen Fügen

Eine andere Möglichkeit des Fügens besteht darin, die Normalkraft F_n kontextabhängig aufzubringen.

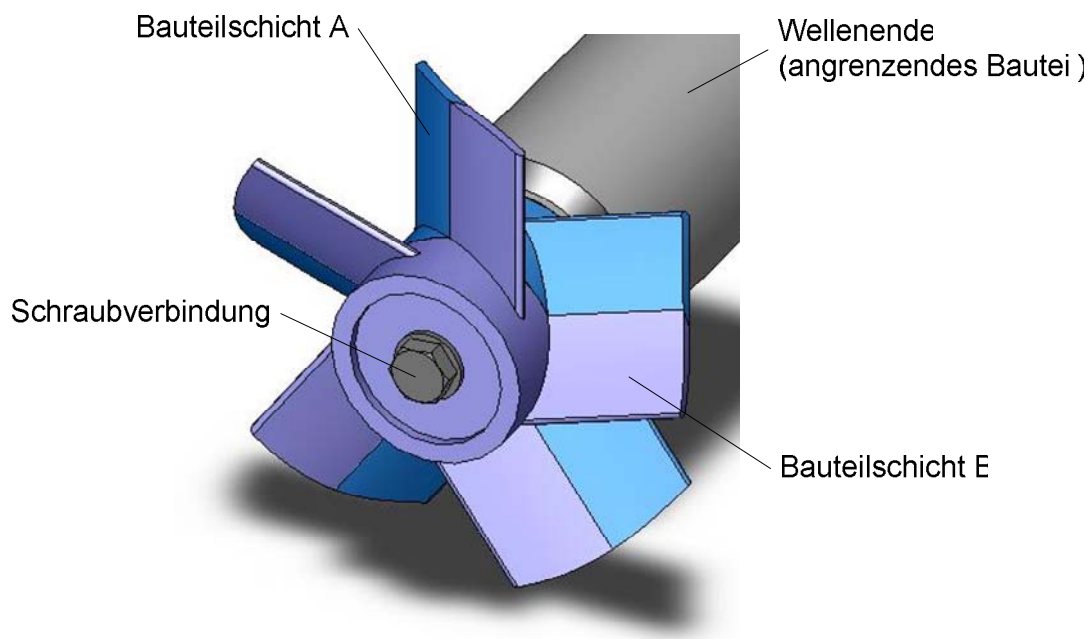
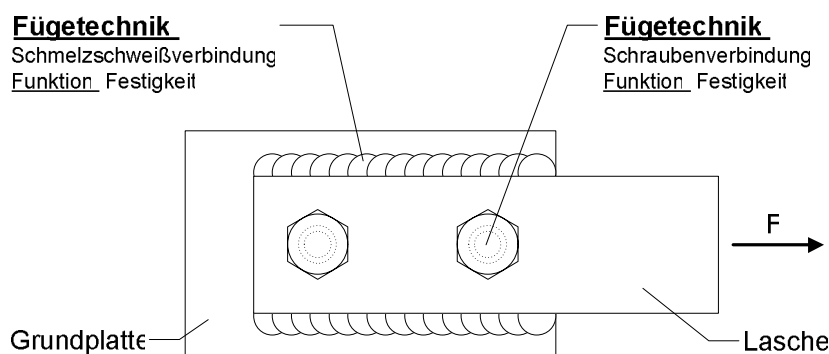


Abbildung 5-7: Schraubverbindung zum kontextabhängigen Fügen

Die **Abbildung 5-7** zeigt eine im Maschinenbau oft vorkommende Schraubverbindung zum Verbinden von Bauteilen. Der Vorteil besteht darin, dass eine ohnehin vorhandene Füge-
technik zum Verbinden des Prototyps mit einem angrenzenden Bauteil auch zum Aufbringen der
Normalkraft F_n verwendet werden kann. Eine separate Füge-
technik wie beim kontext-
unabhängigen Fügen ist nicht notwendig. Da es sich bei der verwendeten Schraubverbindung um
eine reversible Füge-
technik handelt, kann der Prototyp durch Lösen der Verbindung getrennt
werden. Dies ermöglicht ein problemloses Modifizieren des Prototyps durch Austausch einzelner
Bauteilschichten.

5.2.1.2 Festigkeitsbetrachtung

Die Bohrung-Zapfen-Kombination ist in der Lage, Querkraft- und Torsionsbelastungen in der
Trennebene zu übertragen. Der Zusammenhalt der einzelnen Bauteilschichten wird durch eine
kontextunabhängige bzw. –abhängige Füge-
technik erbracht. Wird für das kontextabhängige
Fügen eine Schraubverbindung genutzt, so bewirkt diese zwischen den Bauteilschichten einen
Reibschluss. Durch diesen Reibschluss können ebenfalls Querkraft- und Torsionsbelastungen in
der Trennebene übertragen werden. Dieser Umstand führt zusammen mit der Bohrung-Zapfen-
Kombination zu einer kombinierten Füge-
technik. Für die Auslegung ist zu beachten, dass nur
eine der beiden Füge-
techniken Belastungen in der Trennebene aufnehmen kann. Der Grund
dafür liegt in der mit Schlupf behafteten Bohrung-Zapfen-Kombination, welche zur
Kompensierung der mechanischen Überbestimmung mit einer engen Spielpassung ausgelegt
worden ist. Zur Verdeutlichung wird der Sachverhalt einer weiteren kombinierten Füge-
technik bestehend aus einer Schmelzschweißverbindung und einer Schraubverbindung erläutert
(**Abbildung 5-8**).



**Abbildung 5-8: Kombinierte Füge-
techniken [12]**

Beide Füge-Techniken sind in der Kraftangriffsrichtung in Form einer Parallelschaltung nebeneinander angeordnet und haben die Funktion, die auf die Lasche wirkende Kraft F auf die Grundplatte zu übertragen. Die Schraubverbindung ist im Gegensatz zur Schmelzschweißverbindung mit Schlupf behaftet. Dadurch besteht die Gefahr der Überlastung der Schmelzschweißverbindung [12].

Da das MLJ-Fügekonzept für die Übertragung von Belastungen in der Trennebene die Bohrung-Zapfen-Kombination vorsieht, wird diese im Folgenden einer Festigkeitsbetrachtung unterzogen. Für die Auslegung einer Schraubverbindung oder eines zentralen Pressverbandes zur Aufnahme der Normalkraft F_n wird auf die gängige Literatur verwiesen [10] [13] [14]. Die Bohrung-Zapfen-Kombinationen können in der Trennebene Querkraft- und Torsionsbelastungen aufnehmen und hierbei wird der Zapfen beansprucht auf:

- Biegung,
- Schub und
- Pressung

Die Bohrungen hingegen werden nur auf Pressung belastet. Die mechanischen Belastungen können sowohl aus dem Betrieb als Funktionsprototyp als auch bei der Nutzung als Spanntechnik durch auftretende Zerspankräfte hervorgerufen werden.

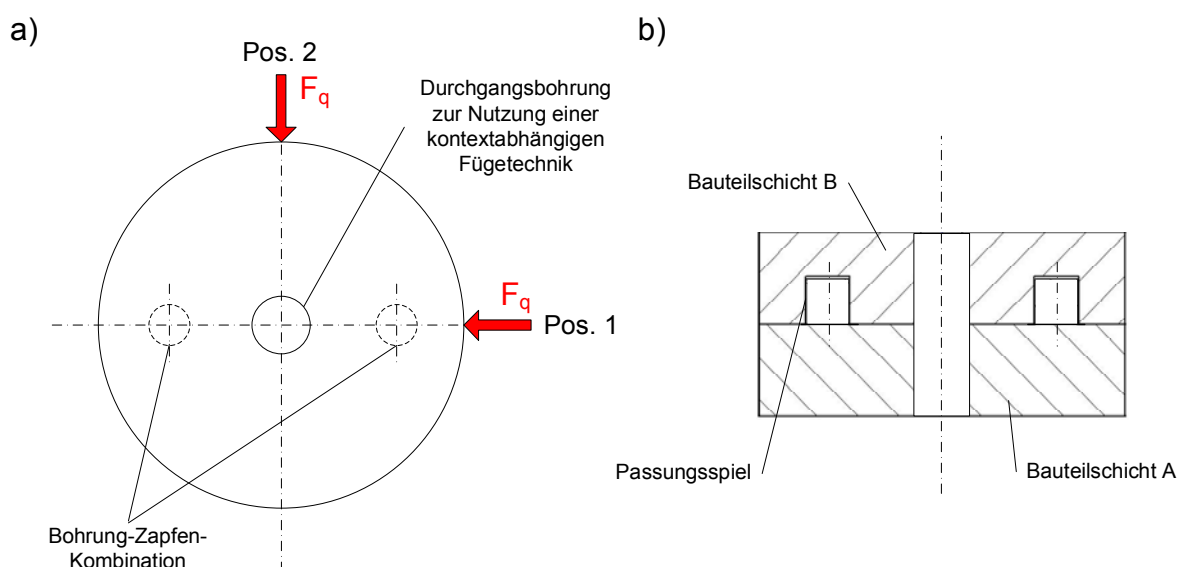


Abbildung 5-9: Bohrung-Zapfen-Kombination a) Draufsicht b) Seitenansicht im Schnitt

Für eine richtige Anwendung der nachfolgenden Auslegungsformeln muss beachtet werden, dass für die Übertragung einer Torsionsbelastung im Gegensatz zur Querkraftbelastung immer beide Bohrung-Zapfen-Kombinationen zur Verfügung stehen (vgl. **Abbildung 5-9**). Bei der Querkraftbelastung ist das abhängig von der Einleitungsrichtung der Querkraft F_q . Zur Veranschaulichung werden zwei Extremfälle betrachtet. Wird die Querkraft F_q aus Position 1 eingeleitet, so muss diese von einer Bohrung-Zapfen-Kombination allein aufgenommen werden. Der Grund dafür besteht in der Spielpassung zwischen Bohrungen und Zapfen zur Kompensation der mechanischen Überbestimmung.

Geschieht die Kraft-Einleitung aus der Position 2 oder aus einer Torsionsbeanspruchung, so tragen beide Bohrung-Zapfen-Kombinationen zu gleichen Teilen, wodurch aufgrund einer doppelt so großen Scherfläche eine größere Querkraft F_q übertragen werden kann. Bei einer umlaufenden Querkraft F_q ist immer mit einer Bohrung-Zapfen-Kombination zu rechnen.

Der Festigkeitsnachweis für die Bohrung-Zapfen-Kombination kann wegen der geometrisch ähnlichen Form analog zur Auslegung von Nieten und Bolzen durchgeführt werden. Dort wird in der Regel aufgrund der meist kurzen und dicken Niete bzw. Bolzen die Biegung vernachlässigt [10]. Da sowohl Querkraft- als auch Torsionsbelastung die Bohrung-Zapfen-Kombination auf Schub und Pressung beanspruchen, gelten die folgenden Auslegungsformeln für beide Belastungsarten gleichermaßen. Zudem können sie problemlos überlagert werden.

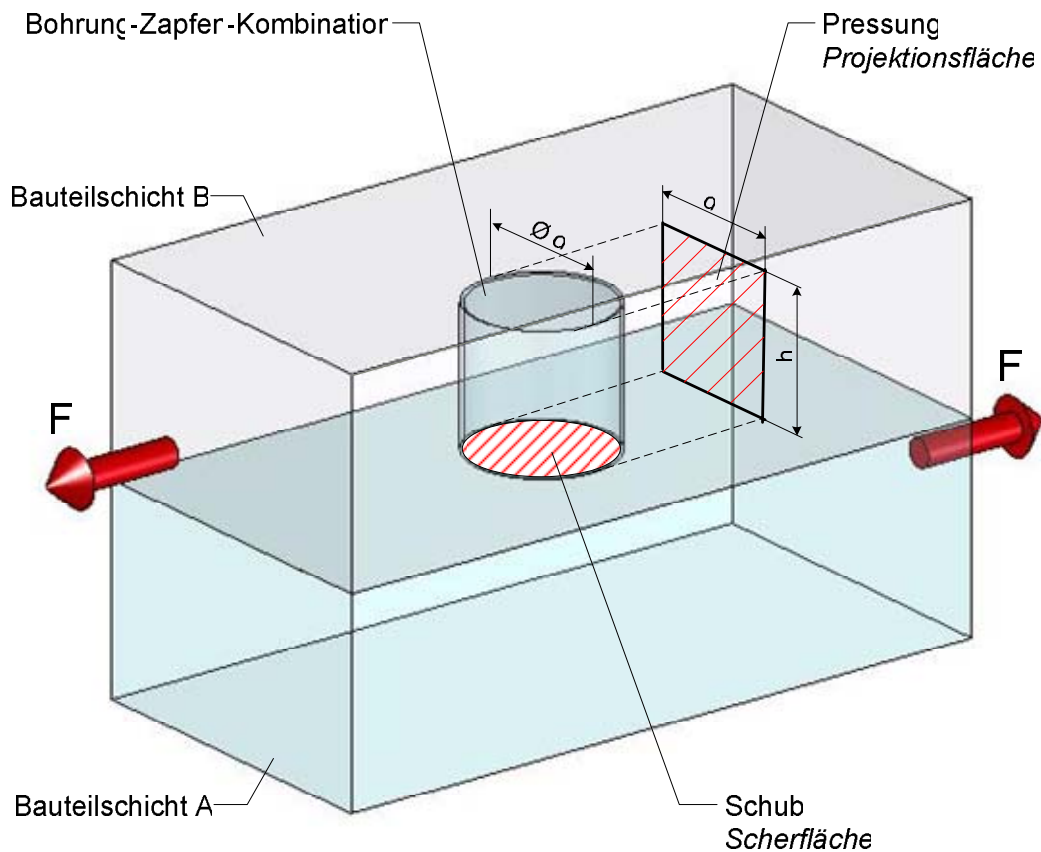


Abbildung 5-10: Schub und Pressung an einer Bohrung-Zapfen-Kombination

Die **Abbildung 5-10** zeigt exemplarisch den Schub und die Pressung an einer Bohrung-Zapfen-Kombination. Für die Berechnung der Schubspannung τ_s , welche real eine ungleichmäßige Verteilung über den Querschnitt ausweist, wird in der Praxis eine gleichmäßige Verteilung, angesetzt. Sie stellt eine integrale Mittelung über den Querschnitt dar (vgl. **Abbildung 5-11**) [10].

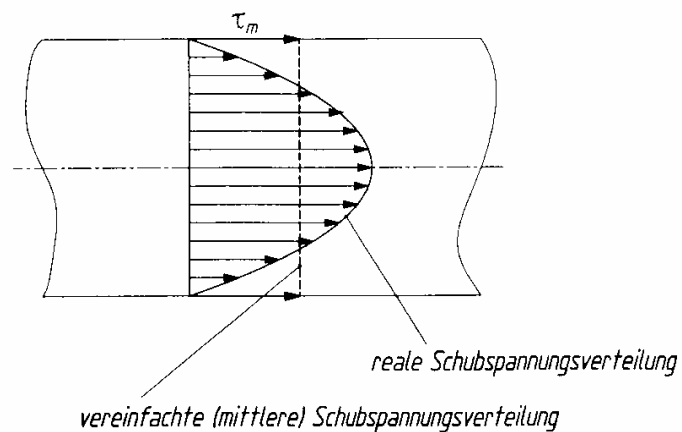


Abbildung 5-11: Schubspannungsverteilung [10]

Die Schubspannung τ_s kann somit nach folgender vereinfachter Formel berechnet werden:

$$\tau_s = \tau_m = \frac{F}{A} \leq \tau_{s,zul} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit

τ_s	Scherspannung	[N/mm ²]
τ_m	mittlere Scherspannung	[N/mm ²]
$\tau_{s,zul}$	zulässige Scherspannung	[N/mm ²]
F	Querkraft F_q	[N]
A	Scherfläche des Zapfens	[mm ²]

Die Scherfläche A des Zapfens ergibt sich zu

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

mit

d	Zapfendurchmesser	[mm]
---	-------------------	------

Neben der Ermittlung der Schubspannung τ_s muss die Flächenpressung p am Zapfen bzw. in der Bohrung berechnet werden. Die **Abbildung 5-12** zeigt den wirklichen und den vereinfachten Verlauf der Pressung p an einem Niet bzw. Bolzen.

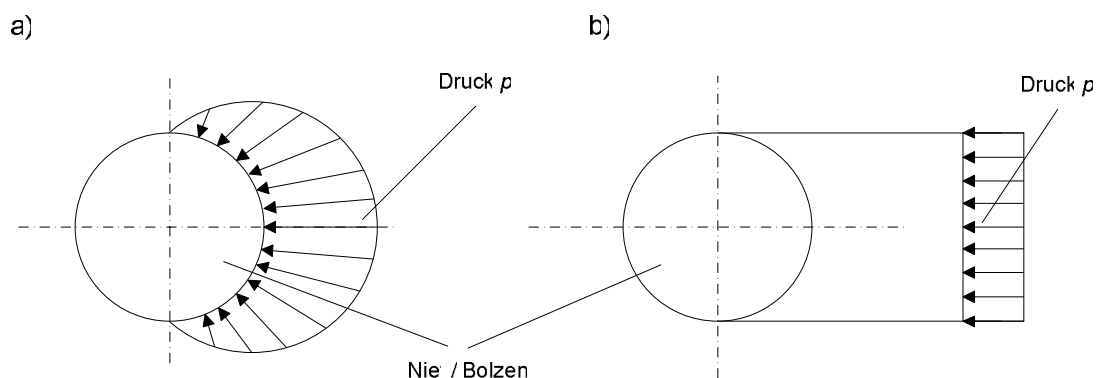


Abbildung 5-12: a) wirklicher Verlauf der Pressung b) vereinfachter Verlauf Pressung [14]

Unter Annahme einer gleichmäßigen Pressungsverteilung wird in der Praxis die gewölbte Fläche des Zapfens sowie die der Bohrung ersetzt durch eine flache rechteckige Projektionsfläche A (vgl. Abbildung 5-10) [14].

Die Pressung p errechnet sich nach

$$p = \frac{F}{A} \leq p_{zul} . \quad (\text{Gl. 5-3})$$

mit

p	Flächenpressung	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
p_{zul}	zulässige Flächenpressung	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
F	Querkraft F_q	$[\text{N}]$
A	Projektionsfläche	$[\text{mm}^2]$

Die Projektionsfläche A ergibt sich zu

$$A = d \cdot h . \quad (\text{Gl. 5-4})$$

mit

d	Zapfen- bzw. Bohrungsdurchmesser	$[\text{mm}]$
h	Zapfenhöhe bzw. Bohrungstiefe	$[\text{mm}]$

5.2.1.3 Vorrichtung

Die Nutzung der Zapfen als Spanntechnik während der Bearbeitung erfordert das Vorhandensein einer speziellen Vorrichtung. Bei der Realisierung der Vorrichtung werden die in Kapitel 3 genannten Anforderungen berücksichtigt. Das Vorrichtungskonzept basiert auf der Nutzung eines herkömmlichen Universal-Maschinenschraubstocks und ist daher auf andere Maschinenschraubstöcke unterschiedlicher Hersteller übertragbar.

Die **Abbildung 5-13a** zeigt einen solchen Schraubstock der Firma *Allmatic* mit Standardspannbacken. Durch das Lösen der Befestigungsschrauben (vgl. Abbildung 5-13b) lassen sich die Standardspannbacken entfernen, wodurch sich der Schraubstock durch die Wahl anderer Spannelemente problemlos modifizieren lässt.

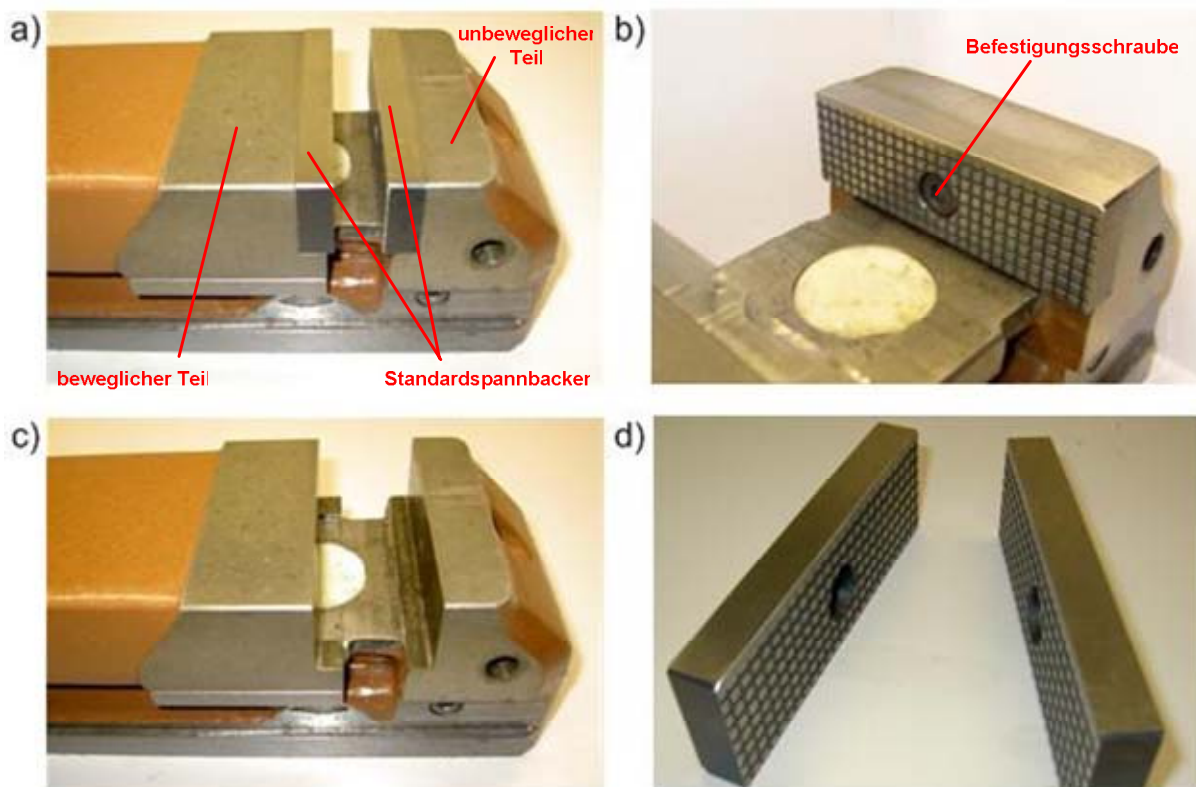


Abbildung 5-13: a) Maschinenschraubstock mit Standardspannbacken b) Befestigung der Standardspannbacke c) Maschinenschraubstock ohne Standardspannbacke d) Standardspannbacke

Die Modifizierbarkeit bietet die Möglichkeit, spezielle Spannbacken für die Aufnahme der inneren Hilfsgeometrie zu entwickeln. Dabei sind grundsätzlich der zur Verfügung stehende Bauraum sowie die Anschlussmaße der Befestigungsbohrung am Schraubstock zu

berücksichtigen (Abbildung 5-13c, d). Im Folgenden wird eine Vorrichtung vorgestellt, welche sich für die Aufnahme der Zapfen eignet und über die Befestigungsbohrungen am Maschinenschraubstock angebracht wird (vgl. **Abbildung 5-14**).

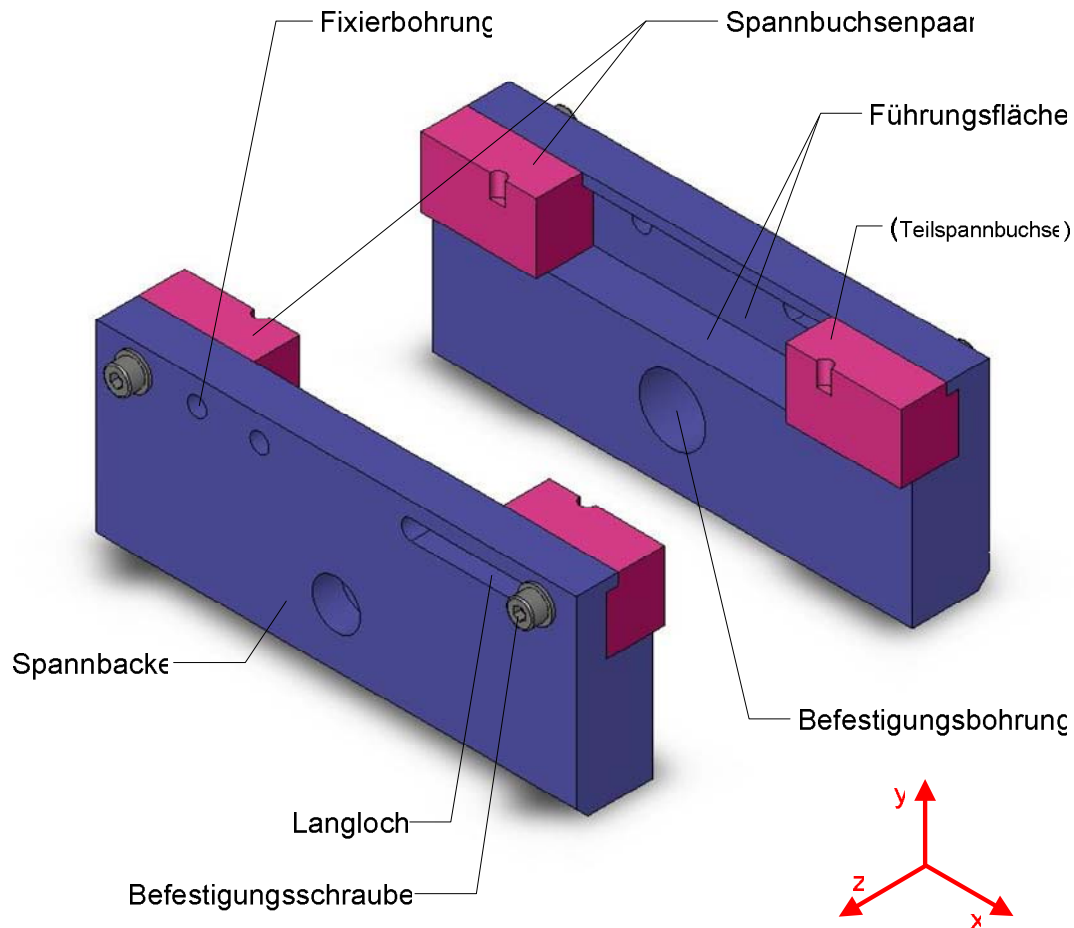


Abbildung 5-14: Vorrichtung

Die Vorrichtung besteht aus zwei spiegelsymmetrischen Spannböcken mit zwei Spannbüchsenpaaren. Dies sind vier Teilspannbüchsen, welche über Führungsflächen in den Spannböcken aufgenommen und mittels Befestigungsschrauben mit ihnen verbunden werden. Die Zapfen der inneren Hilfsgeometrie werden über Bohrungshälften innerhalb der Teilspannbüchsen gespannt und während der Bearbeitung festgehalten (vgl. **Abbildung 5-15a**). Die Hauptspannkraft zum Festhalten der Zapfen erfolgt durch Zustellung des Maschinenschraubstockes in z-Richtung. Dabei wird die bewegliche Spannbacke gegen die feste Spannbacke gedrückt, wodurch die Hauptspannkraft eingeleitet wird (vgl. **Abbildung 5-15b**).

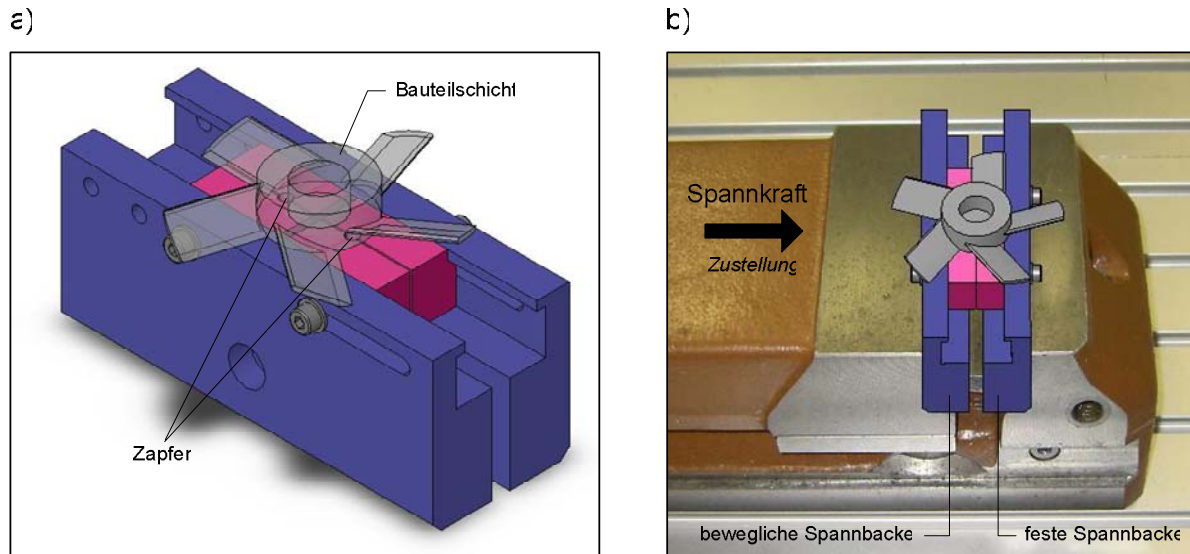


Abbildung 5-15: a) Aufnahme einer Bauteilschicht mit Zapfen b) Gesamtdarstellung: Maschinenschraubstock und Vorrichtung

Damit die Zapfen in Folge der Hauptspannkraft nicht plastisch verformt werden, sind diese auf dem Umfang zu spannen. Dazu werden die Spannbuchsenpaare mit Bohrungshälften versehen, deren Durchmesser dem zu spannenden Zapfen entsprechen. Damit es bei gleichen Durchmessern zu einer Spannwirkung zwischen Spannbuchse und Zapfen kommen kann, ist bei der Herstellung der Teilspannbuchsen darauf zu achten, dass beim Einbringen der Bohrung die bewegliche zur festen Teilspannbuchse einen Spalt aufweist (vgl. **Abbildung 5-16a**).

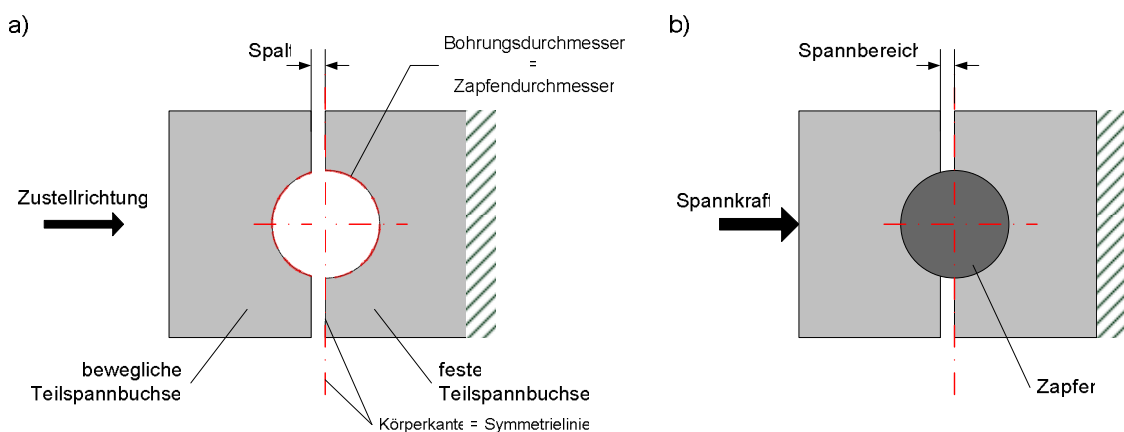


Abbildung 5-16: Spannbuchse (Draufsicht): a) Bohrungspositionierung b) Spannprinzip

Dieser Spalt stellt beim Aufnehmen des Zapfens in die Spannbuchse den späteren Spannbereich dar. In der Praxis hat sich ein Spalt bzw. Spannbereich von 0,1mm – 0,2mm als ausreichend erwiesen (vgl. Abbildung 5-16b).

Für eine eindeutige Lagebestimmung des Zapfens der Bauteilschicht in der Vorrichtung ist es zweckmäßig, den Bohrungsmittelpunkt bzw. die Symmetrielinie der Bohrung auf die Körperkante der festen Teilspannbuchse zu legen. Dadurch kann zum einen die Position der Bohrung beim Einmessen der Vorrichtung in der Fräsmaschine wieder gefunden und als Referenzpunkt für die Bauteilbearbeitung genutzt werden. Zum anderen fallen bei gleich großen Bohrungs- und Zapfendurchmessern die Symmetrielinien beider Elemente zusammen, wodurch die Position des Zapfens eindeutig bestimmt wird.

Für eine vollständige Lagebestimmung der gesamten Bauteilschicht sind jedoch in der Summe sechs Freiheitsgrade zu entziehen. Dazu ist es notwendig, dass die Vorrichtung über Bestimmflächen verfügt. Die **Abbildung 5-17** zeigt die für eine eindeutige Lagebestimmung notwendigen Vorrichtungsbestimmflächen.

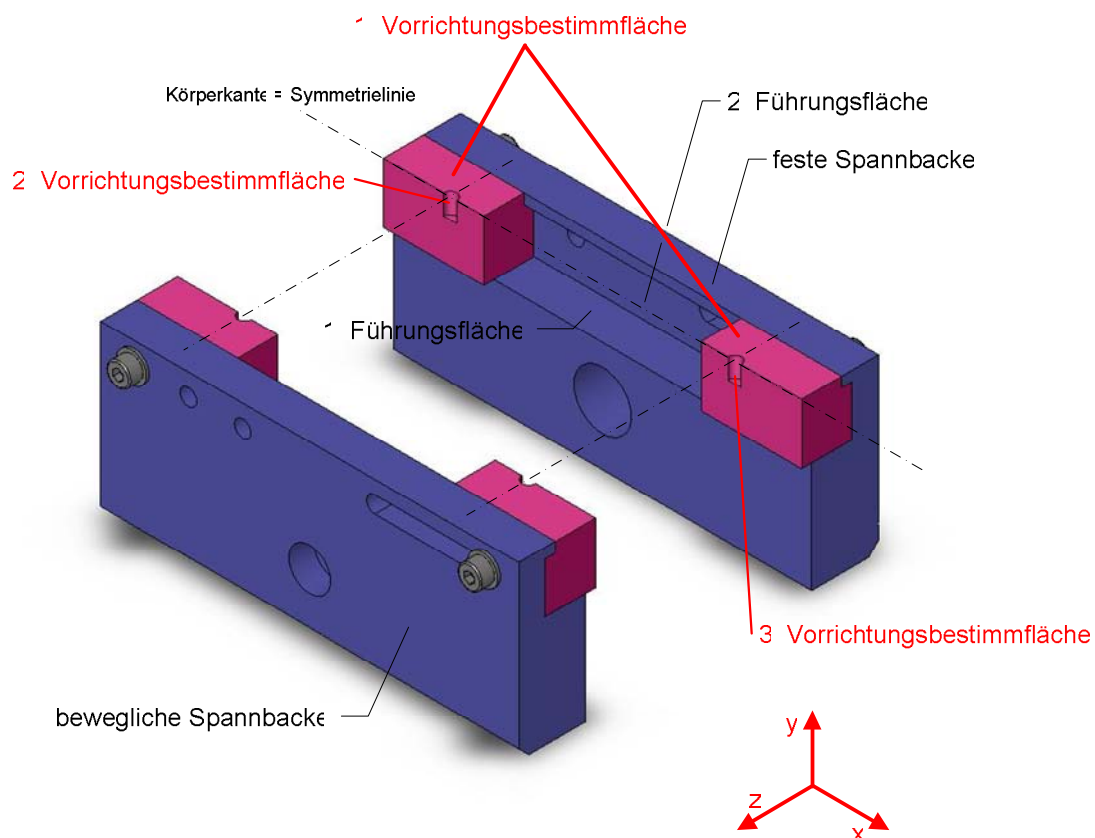


Abbildung 5-17: Bestimmflächen an der Vorrichtung

Die erste Vorrichtungsbestimmfläche wird durch die oberen Deckflächen der festen Teilspannbuchsen gebildet. Sie dienen als Auflagefläche der Bauteilschicht und liegen durch die erste Führungsfläche in einer gemeinsamen Ebene. Sie entziehen der Bauteilschicht drei Freiheitsgrade: die Rotation um die x- und z-Achse sowie die Translation in y-Richtung.

Die zweite Vorrichtungsbestimmfläche wird durch die Mantelfläche der Bohrung der ersten Teilspannbuchse gebildet. Neben der bereits diskutierten Lagebestimmung des Zapfens werden durch sie weitere zwei Freiheitsgrade entzogen: die Translation in x- und z-Richtung.

Der letzte offene Freiheitsgrad, die Rotation um die y-Achse, wird durch die Bohrung der zweiten Teilspannbuchse, welche über das Langloch befestigt wird, entzogen. Sie stellt die dritte Vorrichtungsbestimmfläche dar und nimmt den zweiten Zapfen der Bauteilschicht auf. Durch die gemeinsame Anlange beider Teilspannbuchsen an die zweite Führungsfläche liegen beide Bohrungen auf einer gemeinsamen Mittellinie.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es grundsätzlich zu einer Überbestimmung der Lage der Bauteilschicht in Kombination mit der Bohrung der ersten Teilspannbuchse kommt. Der Grund dafür ist, dass beide Bohrungen über die gleichen Bestimmenseigenschaften verfügen. Damit es zu keiner Überbestimmung kommt, muss dafür gesorgt werden, dass das zweite Spannbuchsenpaar den Zapfen spannungsfrei umschließt, und lediglich die Rotation um die y-Achse sowie ein Abheben der Bauteilschicht in Folge der Bearbeitungskräfte in y-Richtung verhindert. Dieser Vorgang kann problemlos dadurch realisiert werden, indem das zweite Spannbuchsenpaar über das Langloch individuell an den Zapfenabstand angepasst und danach festgezogen wird. Dadurch stehen unabhängig von der Krafteinleitungsrichtung (vgl. Abbildung 5-9) für die Aufnahme von Querkraften F_q immer zwei Zapfen zur Verfügung. Diese Situation ist bei der Auslegung unter dem Einfluss der Zerspankräfte zu berücksichtigen.

Um Bauteilschichten unterschiedlicher Zapfendurchmesser und -abstände spannen zu können, wird die Vorrichtung variabel gestaltet. Durch den Austausch der Spannbuchsenpaare ist es möglich, Zapfen unterschiedlicher Durchmesser in die Vorrichtung aufzunehmen. Die Bereitstellung eines Baukastensystems mit Spannbuchsenpaaren unterschiedlicher Bohrungsdurchmesser erlaubt ein problemloses Anpassen der Vorrichtung auf die jeweilige zu bearbeitende Bauteilschicht. Das Aufnehmen von Bauteilschichten unterschiedlicher Zapfenabstände geschieht durch das stufenlose Verschieben des zweiten Spannbuchsenpaares

entlang des Langloches. Zur Erweiterung des Einstellbereiches kann zusätzlich das erste Spannbuchsenpaar an drei unterschiedlichen Positionen über Fixierbohrungen befestigt werden.

Damit der durch die Vorrichtung modifizierte Maschinenschraubstock auch für die Bearbeitung von Bauteilen bzw. Bauteilschichten ohne Zapfen zur Verfügung steht, können die Spannbuchsenpaare durch Spannleisten ersetzt werden. Dies hat eine Minimierung der Rüstzeit zur Folge, da eine Demontage der gesamten Vorrichtung sowie die anschließende Montage von konventionellen Spannbacken entfallen.

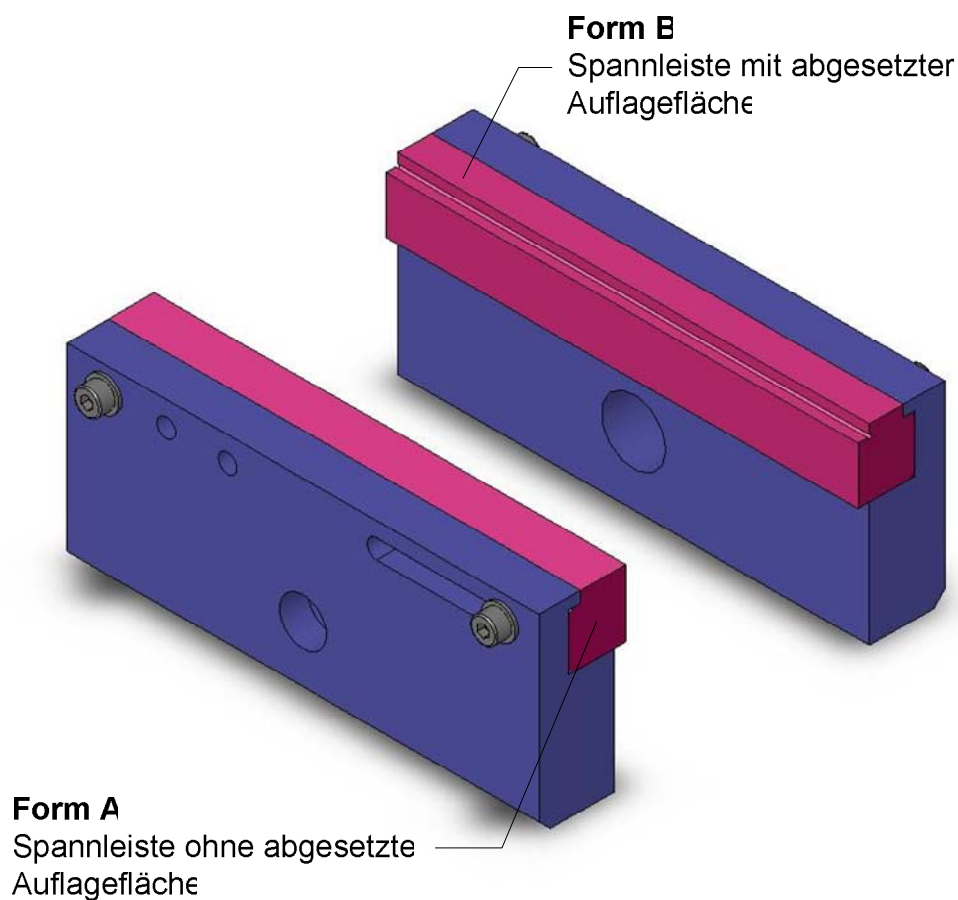


Abbildung 5-18: Spannleiste ohne (Form A) und mit abgesetzter Auflagefläche (Form B)

Die **Abbildung 5-18** zeigt zwei unterschiedliche Formen der Spannleisten. Die Form A entspricht einer normalen Standardbacke, während die Form B über abgesetzte Auflageflächen verfügt, wodurch Bauteile mit geringer Höhe parallel zum Maschinentisch eingespannt werden können.

5.2.2 Prismen-Verzahnung

Im Folgenden wird eine Füge- und MLJ-Technik für die Fräs- und Drehbearbeitung auf der Basis des MLJ-Füge- und MLJ-Vorrichtungskonzeptes entwickelt. Die Füge- und MLJ-Technik stellt eine Schnittstelle zwischen beiden Fertigungsverfahren her, welche es erlaubt, den herzustellenden Prototyp sowohl einer Fräs- als auch einer Drehbearbeitung zu unterziehen. Damit stehen bei der Prototypenherstellung die Vorteile beider Fertigungsverfahren zur Verfügung. Während die Fräsbearbeitung die Herstellung von hochkomplexen Geometrien erlaubt, ermöglicht die Drehbearbeitung die Herstellung von hochgenauen Rotationskörpern. Die Füge- und MLJ-Technik soll vor allem bei Prototypen Anwendung finden, welche in Regionen einer Fräs- und Drehbearbeitung unterteilt werden müssen. Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen aus Kapitel 3 werden dazu spezielle Bedingungen an die Geometrie der Füge- und MLJ-Technik gestellt, die eine Nutzung als Spanntechnik für beide Fertigungsverfahren während der Bauteilbearbeitung erlaubt. Gerade in Hinblick auf die Drehbearbeitung sind dafür spezielle Positioniereigenschaften erforderlich, welche sich deutlich von denen einer Fräsbearbeitung unterscheiden. Im Anschluss daran erfolgt eine Festigkeitsbetrachtung der Füge- und MLJ-Technik, sowie abschließend die Entwicklung von Vorrichtungen zur Aufnahme in eine Fräs- und Drehmaschine.

5.2.2.1 Füge- und MLJ-Technik

Durch die bereits diskutierten Analogien zwischen Füge- und MLJ-Technik und Vorrichtungsbau wird die Herleitung beispielhaft an Bestimmelementen des Vorrichtungsbaus vorgenommen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die systematische Entwicklung von Geometrien mit besonderen Eigenschaften bezüglich der Positionierung [15]. Für die Aufnahme in eine Drehmaschine ist eine Füge- und MLJ-Technik notwendig, welche die Geometrie zentrisch positioniert. Dazu ist eine Vollzentrierung notwendig, welche eine Überlagerung der Werkstückmittelachse mit der Drehachse der Drehmaschine sicherstellt [16]. Der Vorrichtungsbau bietet hier eine Fülle von Möglichkeiten, welche sich in jahrelanger Erprobung in der Praxis bewährt haben.

Die **Abbildung 5-19a** zeigt einen kreiszylindrischen Körper mit einer Bohrung. Soll die Bohrung bzw. die Bohrungslängsachse durch die Mittelebene des zylindrischen Körpers verlaufen, so ist ein Bestimmen nach der Mittelebene erforderlich. Durch Einlegen in ein Prisma wird der

zylindrische Körper nach der Mittelebene bestimmt (vgl. Abbildung 5-19b). Dabei deckt sich die Bestimmebene mit der Mittelebene. Die Bestimmebene ergibt sich aus dem Kontakt zwischen Werkstückbestimmfläche (Mantelfläche) und der Vorrichtungbestimmfläche (ausgeführt als Prisma). Das Zentrieren nach einer Mittelebene wird als Halbzentrieren bezeichnet [17].

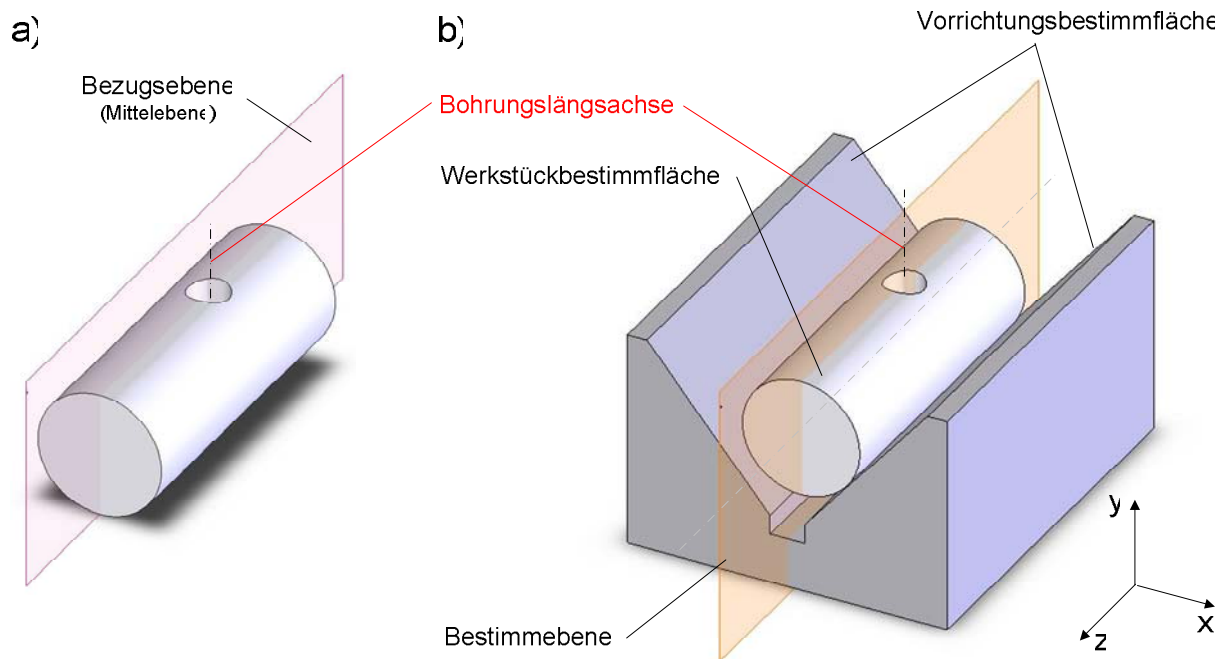


Abbildung 5-19: a) Bohrung durch Mittelebene b) Bestimmen nach Mittelebene mittels Prisma

Hierbei werden dem kreiszylindrischen Körper vier Freiheitsgrade entzogen, so dass nur noch eine translatorische Bewegung in Richtung der z-Achse sowie eine rotatorische Bewegung um die z-Achse möglich sind. Dabei stellt die Mantelfläche eine doppelte Führungsfläche dar, wenn $l > d$ (l = Länge; d = Durchmesser) ist. Ist jedoch $l < d$, wird die Mantelfläche zur einfachen Führungsfläche und entzieht dem Werkstück lediglich zwei Freiheitsgrade [17]. Der Grund dafür ist, dass kein ausreichend sicherer Stand des kreiszylindrischen Körpers durch seine Mantelfläche gegeben ist. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht, wenn die Prismenlänge gegenüber der Werkstücklänge sehr viel kleiner ist. Daraus ergibt sich die folgende modifizierte Darstellung aus zwei parallel zueinander ausgerichteten kurzen Prismen (vgl. **Abbildung 5-20**).

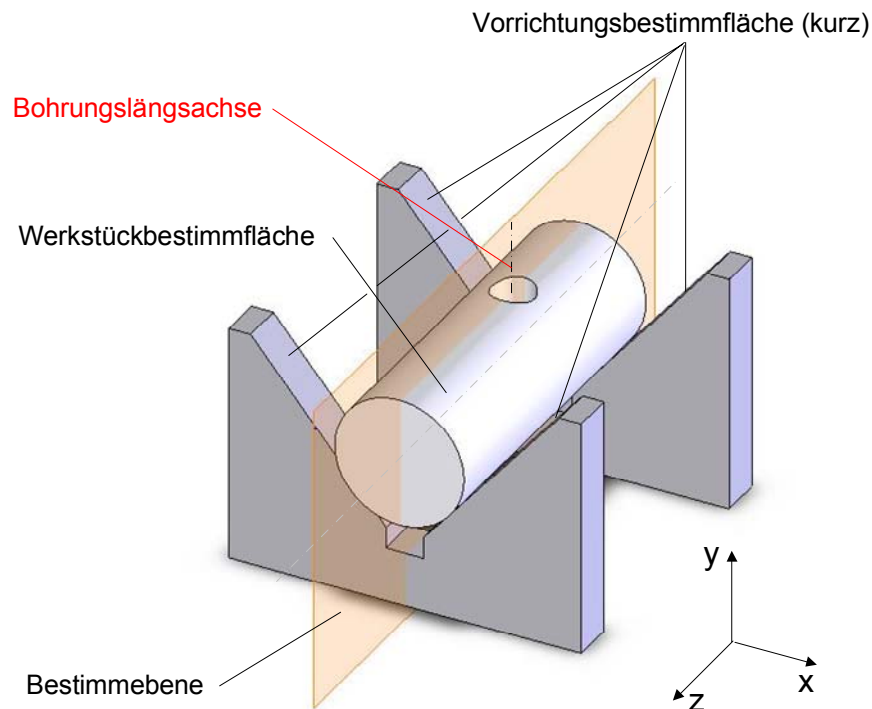


Abbildung 5-20: Bestimmen nach Mittelebene mittels zwei kurzen Prismen

Durch die parallele Ausrichtung der kurzen Prismen entsteht wie bei einem langen Prisma eine gemeinsame Bestimmebene und die Bestimmebene beider Prismen fällt zusammen. Jedes kurze Prisma entzieht dem zylindrischen Körper zwei Freiheitsgrade. In ihrer gemeinsamen Funktion verfügen sie über die gleichen Zentriereigenschaften wie ein langes Prisma. Es kann festgehalten werden, dass ein Prisma aufgrund seiner Geometrie nach einer Mittelebene hin zentriert, wodurch mindestens zwei Freiheitsgrade entzogen werden.

Für die geforderte Vollzentrierung ist es notwendig, einen Körper nach drei Mittelebenen festzulegen, wobei sechs Freiheitsgrade entzogen werden [16]. Wenn drei kurze Prismen so angeordnet werden, dass deren Mittelebene sich unter einem Winkel schneiden, so wird dadurch ein eingelegter Körper voll zentriert [16]. Die **Abbildung 5-21** zeigt eine symmetrische Anordnung von drei kurzen Prismen, welche zum Mittelpunkt hin zentrieren.

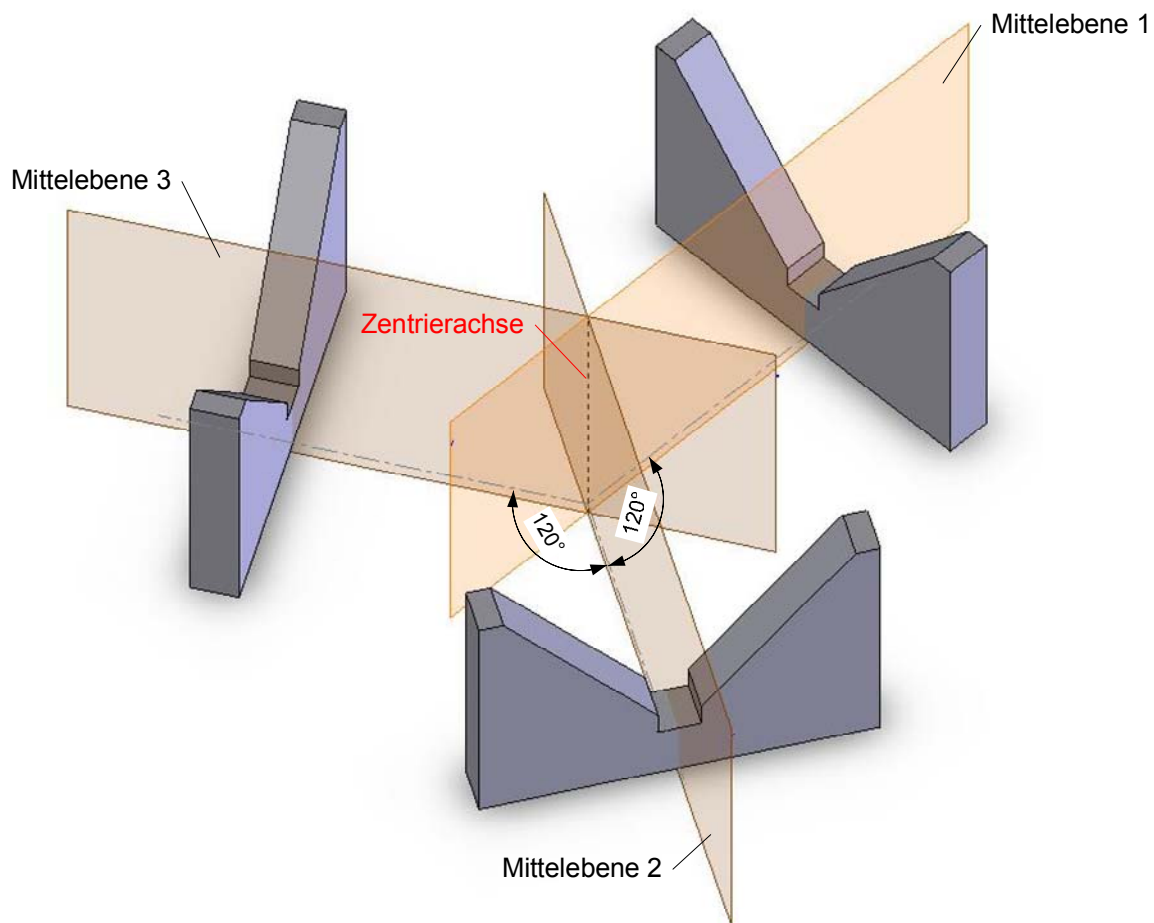


Abbildung 5-21: Vollzentrierung durch 120°-Anordnung von drei kurzen Prismen

Die **Abbildung 5-22a** zeigt die Prismen auf dem Umfang eines kreiszylindrischen Körpers abgewickelt. Die Abwicklung bewirkt eine gleichmäßige Aufteilung zwischen Prismenfuß und Prismenkopf. Damit ist das Gegenstück zum Vollzentrieren die Prismenverzahnung selbst. Weiterhin eignet sich die zylindrische Geometrie im Hinblick auf die Nutzung als Spanntechnik bestens für die Aufnahme in ein Drehmaschinenfutter (z.B. Dreibackenfutter). Durch den gegenseitigen Kontakt der Bestimmflächen ergeben sich drei Bestimmenebenen, welche sich im Zentrum der Zentrierachse schneiden (vgl. Abbildung 5-22b). Analog zu der Abbildung 5-21 ergibt sich hier eine Vollzentrierung der Prismenverzahnungen untereinander.

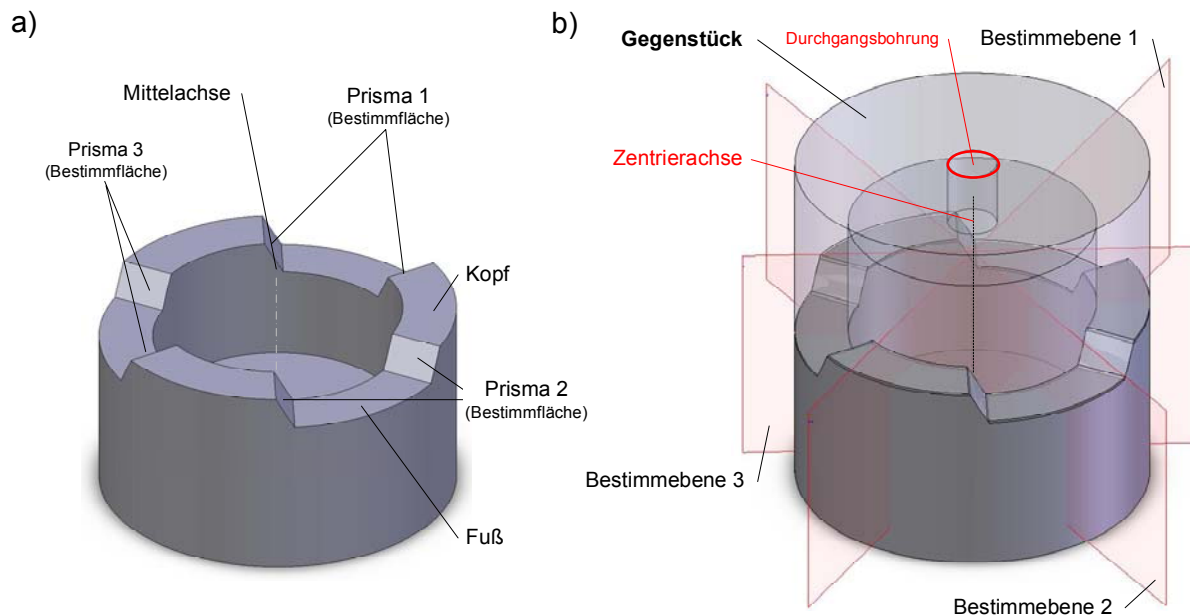


Abbildung 5-22: a) Prismenverzahnung b) mit Gegenstück und Bestimmenebenen

Um den Zusammenhalt der Prismenverzahnung zu gewährleisten und die Normalkräfte F_n in Richtung der Zentrierachse aufzunehmen, sind diese über die bereits eingebrachte Durchgangsbohrung miteinander zu verspannen. Das Aufbringen einer Vorspannkraft F_v kann mittels einer Schraubverbindung erfolgen. Für eine korrekte Vollzentrierung der Prismenverzahnung ist es erforderlich, dass diese nur auf den Bestimmflächen, den Flanken der Prismen, trägt. Daher ist darauf zu achten, dass die Köpfe der Prismenverzahnungen beider Hälften sich nicht berühren. Dazu werden die Köpfe der Prismenverzahnung durch eine Kopfrücknahme in der Höhe reduziert und somit ist ein Kontakt zwischen Kopf und Fuß nicht möglich.

Die entwickelte Prismenverzahnung ähnelt in ihrer Geometrie wie auch in der Eigenschaft der Vollzentrierung der bereits bekannten Hirth-Stirnverzahnung der Firma *Voith Turbo*. Diese ist neben der Vollzentrierung bekannt für eine hohe Plan- und Rundlaufgenauigkeit, der Übertragung hoher Drehmomente sowie für eine gute Verschleißfestigkeit [13]. Die Unterschiede zur Hirth-Stirnverzahnung liegen in der Ausbildung der Zahngeometrie sowie in der Anzahl der Zähne. Die **Abbildung 5-23** zeigt die Vorderansicht und Draufsicht der Hirth-Stirnverzahnung. Zu erkennen ist, dass die Zahnflanken der Zähne strahlenförmig zum Mittelpunkt hin zulaufen, wodurch eine Abnahme der Zahnflankenfläche hervorgerufen wird. Die Abnahme der Zahnflankenfläche bewirkt, dass die Zähne zum Mittelpunkt ineinander übergehen.

Unter Beibehaltung dieser Zahngeometrie sind zwei unterschiedliche Zahnformen in der Praxis bekannt.

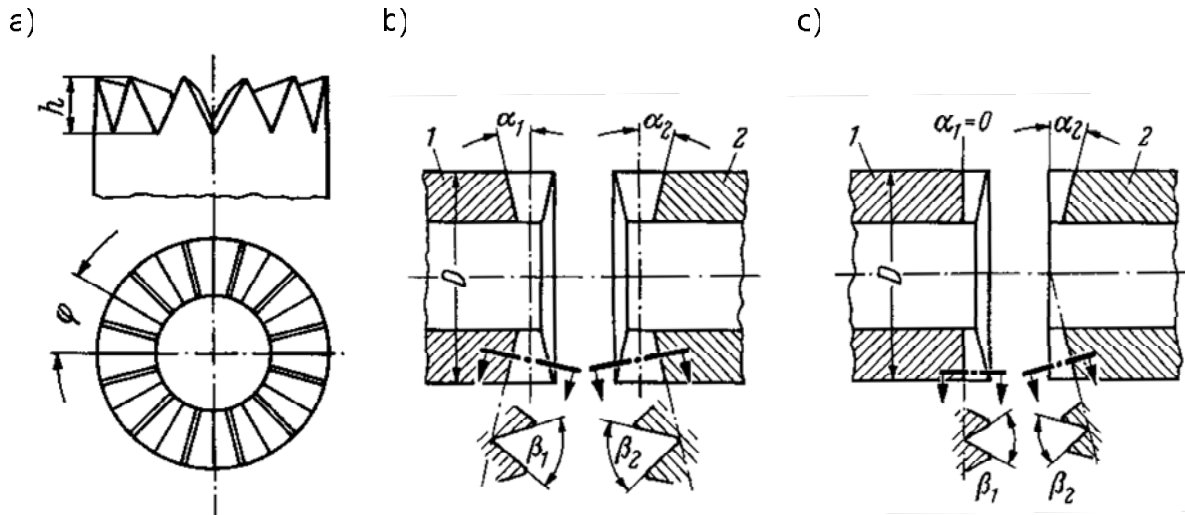


Abbildung 5-23: a) Hirth-Stirnverzahnung b) symmetrische Form c) asymmetrische Form [18]

Bei der symmetrischen Form (vgl. Abbildung 5-23b) ist der Winkel α_1 , mit dem der Zahnfuß zur Mittelachse hin ansteigt, gleich dem Winkel α_2 , mit dem der Zahnkopf zu Mitte hin abfällt. Im Gegensatz dazu, besitzt bei der asymmetrischen Form (vgl. Abbildung 5-23c) eine Verzahnungshälfte fallende Zahnköpfe bei auf gleichem Niveau bleibenden Zahnfüßen, während das Gegenstück passend dazu ansteigende Zahnfüße bei auf gleichem Niveau bleibenden Zahnköpfe besitzt.

Die Abnahme der Zahnflankenfläche wird durch eine höhere Zähnezahzahl kompensiert, wodurch die Hirth-Verzahnung höhere mechanische Belastungen aufnehmen kann. Übliche Zähnezahlen sind 12, 24, 36, 48, 72, 96, etc. [18]. Damit geht jedoch eine Überbestimmung der Verzahnung einher, welcher nur durch eine hohe Fertigungsgenauigkeit der einzelnen Zähne entgegen gewirkt werden kann. Die Firma *Tedisa* stellt deshalb die Verzahnung nur durch Schleifen her, während die Firma *Voith Turbo* die Verfahren Fräsen und Schleifen kombiniert [19].

Bei der Betrachtung der Prismenverzahnung wird deutlich, dass dort nur die Mittellinien der Flankenflächen auf den Mittelpunkt zulaufen. Das hat den Vorteil, dass Zahnfüße und Zahnköpfe auf dem gleichen Niveau gehalten werden können, was eine konstante Zahnflankenfläche zur Folge hat (vgl. **Abbildung 5-24**).

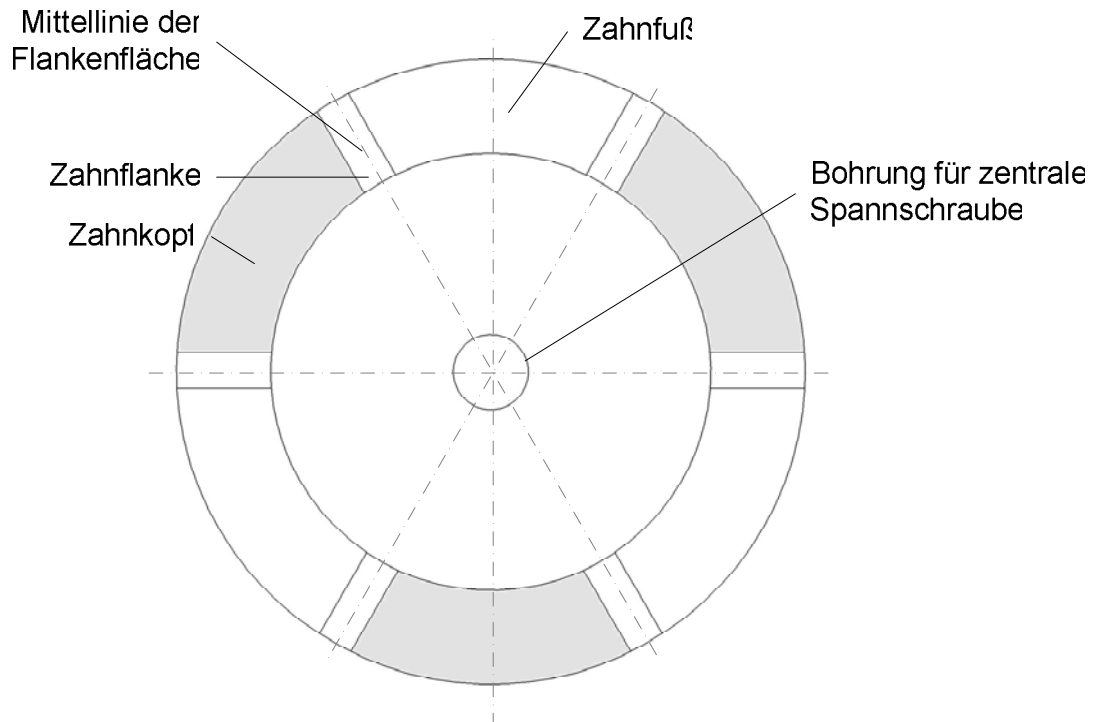


Abbildung 5-24: Draufsicht: Prismenverzahnung

Für eine Übertragung von mechanischen Belastungen steht somit eine größere Zahnflankenfläche pro Zahn zur Verfügung. Ähnlich wie bei der Hirth-Stirnverzahnung kommt es zum Mittelpunkt hin zu einer Überschneidung der Zähne, so dass diese nicht bis dorthin ausgeführt werden können. Dies ist jedoch nicht weiter von Bedeutung, da im Zentrum der Prismenverzahnung die Bohrung für die zentrale Spannschraube vorgesehen ist. Eine einfache Zahngeometrie ermöglicht die Herstellung der Zahnflanken mittels eines Trapez-Fräasers. Das hat den Vorteil, dass die Geometrie des Fräasers zur Flankenbildung der Prismenverzahnung genutzt werden kann, was zu einer Erhöhung des Flächentraganteils führt.

5.2.2.2 Festigkeitsbetrachtung

Da die Prismenverzahnung der Hirth-Stirnverzahnung ähnelt, können für einen überschlägigen Festigkeitsnachweis die Grundüberlegungen zur Auslegung der Hirth-Stirnverzahnung nach Bunge [20] herangezogen werden. Diese beschäftigten sich im Wesentlichen mit dem Tragfestigkeitsnachweis gegen Ermüdungsbruch im Zahnfuß. Der Grund dafür ist, dass bedingt durch die hohe Zähnezahl zum einen die Zahnfußfläche kleiner als die Zahnflankenfläche ist, weswegen diese den gefährdeten Querschnitt darstellt, und weil zum anderen die Zähne auf

Biegung beansprucht werden. Für den überschlägigen Festigkeitsnachweis werden im Wesentlichen nur die mechanischen Grundüberlegungen herangezogen.

Zur Übertragung von mechanischen Belastungen ist die Füge-technik vorzuspannen. Das Vorspannen verhindert das Abheben von unbelasteten Zahnflanken und somit ein Auseinandergleiten der Verzahnung. Weiterhin trägt das Vorspannen zu einer Erhöhung des Traganteils bei, da so Fertigungsungenauigkeiten, wie z.B. die Unebenheiten an den Kontaktflächen, reduziert werden [20]. Da die Prismenverzahnung lediglich über drei Zähne verfügt, ist der Zahnfußquerschnitt gegenüber der Zahnflanke sehr viel größer. Aus diesem Grund erfolgt eine überschlägige Auslegung anhand der auftretenden Flächenpressung p an den Zahnflanken. Hierbei sind zwei Fälle zu berücksichtigen:

1. Flächenpressung $p \geq p_{zul}$
2. Flächenpressung $p = 0 \text{ N/mm}^2$

Fall 1 führt zu einer mechanischen Überbelastung der Zahnflankenfläche mit dem Ergebnis, dass der Werkstoff unter dem Einfluss der Flächenpressung p plastisch verformt wird. Der zweite Fall hingegen führt zu dem bereits angesprochenen Auseinandergleiten der Füge-technik. Auftretende mechanische Belastungen reduzieren die Vorspannkraft F_v an nicht belasteten Zahnflanken und können diese bei nicht ausreichend großer Vorspannkraft F_v sogar kompensieren.

Im Folgenden werden die mechanischen Belastungen:

- Vorspannung (Längskraftbelastung),
- Torsionsbelastung,
- Querkraftbelastung und
- Biegebelastung

getrennt von einander betrachtet. Da es sich dabei um lineare Zusammenhänge handelt, können diese beliebig überlagert werden. Die mechanischen Belastungen können sowohl aus dem Betrieb als Funktionsprototyp als auch bei der Nutzung als Spanntechnik durch auftretende Zerspankräfte hervorgerufen werden.

Die **Abbildung 5-25** zeigt die Füge-technik unter der Vorspannung F_v (Längskraftbelastung). Für die Ermittlung der Flächen-*pression* p_v ist zunächst die Vorspannkraft $F_{v, Fl}$ pro Zahnflanke zu bestimmen.

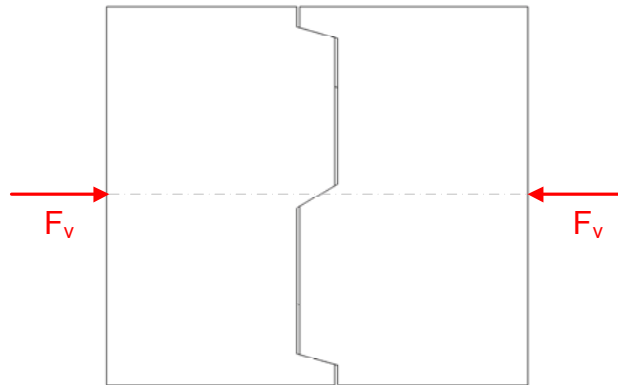


Abbildung 5-25: Füge-technik unter Vorspannung F_v

Diese errechnet sich nach:

$$F_{v, Fl} = \frac{F_v}{6} \quad (\text{Gl. 5-5})$$

Zur Bestimmung der Flächen-*pression* $p_{v, Fl}$ wird die Normalkraft $F_{vn, Fl}$ auf der Flankenfläche mit folgender trigonometrischen Beziehung bestimmt (vgl. **Abbildung 5-26**).

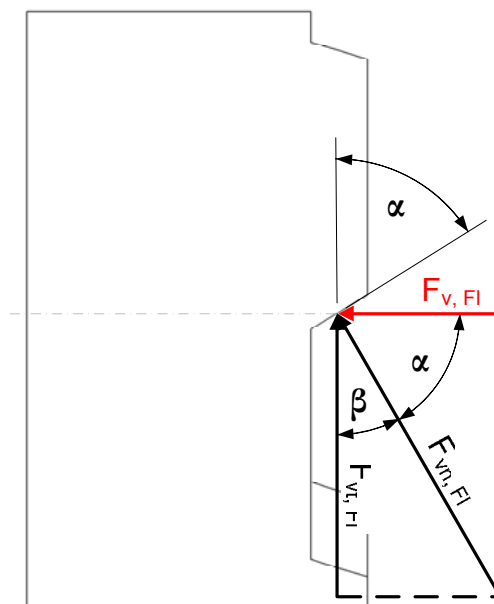


Abbildung 5-26: Ermittlung der Normalkraft $F_{vn, Fl}$

$$F_{v,Fl} = \frac{F_{v,Fl}}{\cos \alpha} \quad \text{mit } \alpha = \text{Flankenwinkel} \quad (\text{Gl. 5-6})$$

Damit ergibt sich die Flächenpressung $p_{v, Fl}$ zu

$$p_{v, Fl} = \frac{F_{v, Fl}}{A} \quad \text{mit } A = \text{Flankenfläche} \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Zur Übertragung von Betriebslasten darf die zulässige Flächenpressung p_{zul} durch die Vorspannkraft F_v nicht ausgeschöpft werden. Die Vorspannkraft F_v muss so gewählt werden, dass diese zum einen in Verbindung mit der zu übertragenden Belastung die maximal zulässige Flächenpressung p_{zul} nicht überschreitet und zum anderen die Flächenpressung p an entlasteten Zahnflanken aufrecht erhält, um ein Auseinandergleiten der Füge-
 Technik zu verhindern. Die Größe der Vorspannkraft F_v richtet sich nach der Art der zu übertragenden Belastung. Ist der Betrag der Flächenpressung p bekannt, um den die Zahnflanken in Folge der zu übertragenden Belastung entlastet werden, so muss die folgende Ungleichung bezüglich der Vorspannkraft F_v erfüllt sein:

$$F_v > 6 \cdot A \cdot p_{v, Fl} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 5-8})$$

Die so ermittelte Vorspannkraft F_v stellt die Eingangsgröße für die Auslegung der Schraubverbindung dar. An dieser Stelle sei auf die Standard-Literatur verwiesen, welche sich eingehend mit der Thematik von Schraubenverbindungen beschäftigt [10] [13] [14].

A schematic diagram of a beam with a central notch. The beam is represented by a gray rectangular shape with a vertical notch in the center. A horizontal dashed line passes through the center of the beam, representing the longitudinal axis. On the left end of the beam, a black arrow labeled F_t points to the right, and a red arrow labeled M_t points to the right. On the right end of the beam, a black arrow labeled F_t points to the left, and a red arrow labeled M_t points to the left.

Das Torsionsmoment \mathbf{M}_t führt zu einer Tangentialkraft \mathbf{F}_t , welche auf die Vorder- und Rückflanken der Zähne wirkt (vgl. **Abbildung 5-28**). Dabei führt die Tangentialkraft \mathbf{F}_t in Wirkrichtung des Torsionsmomentes \mathbf{M}_t zu einer Belastung der Vorderflanken, während die Rückflanken der Zähne im gleichen Maße entlastet werden.

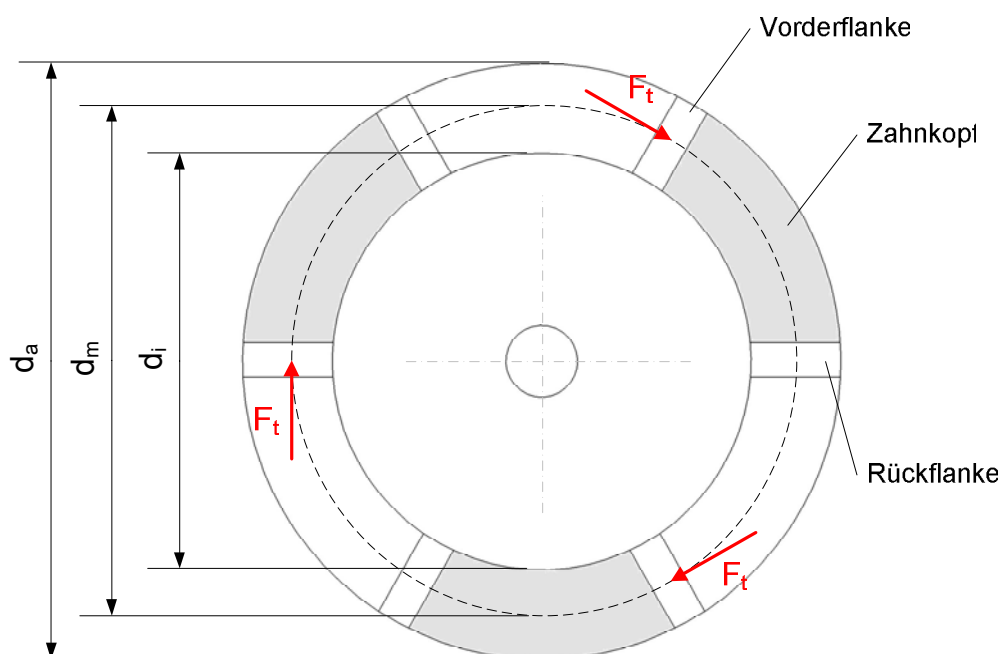


Abbildung 5-28: Aus der Torsionsbelastung M_t resultierende Tangentialkraft F_t

Abgeleitet aus der Torsionsbelastung M_t , lässt sich nach folgender Beziehung die auf einen Zahn wirkende Tangentialkraft F_t berechnen:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_t}{3 \cdot d_m} \quad (\text{Gl. 5-9})$$

$$\text{mit } d_m = d_i + \frac{d_a - d_i}{2} \quad (\text{Gl. 5-10})$$

Die aus der Tangentialkraft F_t resultierende Normalkraft F_m ergibt sich zu:

$$F_m = \frac{F_t}{\sin \alpha} \quad \text{mit } \alpha = \text{Flankenwinkel} \quad (\text{Gl. 5-11})$$

Die **Abbildung 5-29** verdeutlicht diesen trigonometrischen Zusammenhang. Bei der Kraftkomponente F_{ta} handelt es sich um eine Axialkraft in Folge der Torsionsbelastung, welche ein Auseinanderschieben der Füge-technik anstrebt. Diesem Vorgang ist durch die Vorspannkraft F_v entgegenzuwirken.

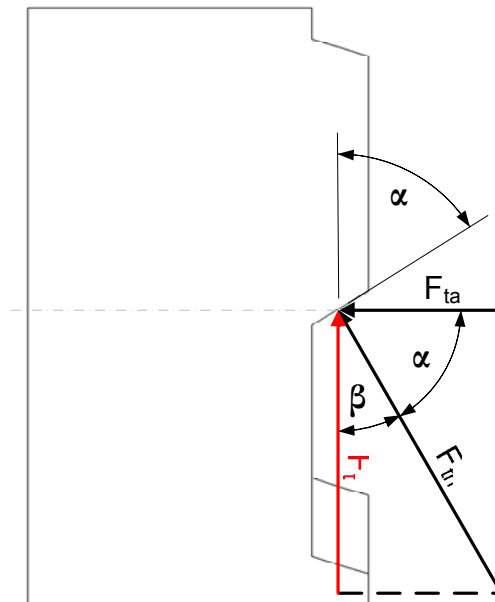


Abbildung 5-29: Torsionsbelastung M_t ; Ermittlung der Normalkraft F_m

Für die Ermittlung der Flächenpressung p_t wird die Normalkraft F_m auf die Flankenfläche A bezogen:

$$p_t = \frac{F_m}{A} \quad \text{mit } A = \text{Flankenfläche} \quad (\text{Gl. 5-12})$$

Unter Berücksichtigung der aus der Vorspannung F_v resultierenden Flächenpressung p_v ergibt sich daraus eine Gesamtflächenpressung p_{tg} . Dabei erhöht sich die Flächenpressung der Vorderflanke zu

$$p_{tg} = p_v + p_t \quad (\text{Gl. 5-13})$$

In dem gleichen Maße wird die Rückflanke um den Betrag der Flächenpressung p_t entlastet und ergibt sich somit zu:

$$p_{tg} = p_v - p_t \quad (\text{Gl. 5-14})$$

Damit weder die zulässige Flächenpressung p_{tg} überschritten wird, noch ein Auseinandergleiten der Füge-technik stattfindet, müssen folgende Auslegungskriterien erfüllt sein. Für die Vorderflanke eines Zahnes gilt:

$$p_{tg} \leq p_{zul} \quad (\text{Gl. 5-15})$$

und für die Rückflanke eines Zahnes gilt:

$$p_{tg} > 0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 5-16})$$

Damit ein Abheben der Füge-technik in Folge der Torsionsbelastung M_t nicht eintritt, ist folgende Ungleichung (vgl. Gl. 5-8) bezüglich der Vorspannkraft F_v zu erfüllen:

$$F_v > 3 \cdot A \cdot p_t \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 5-17})$$

Die **Abbildung 5-30** zeigt die Füge-technik unter Vorspannung F_v und Querkraftbelastung F_q . Für die Nachrechnung der Füge-technik wird eine ungünstige Zahnstellung gegenüber der eingeleiteten Belastung gewählt. Diese Maßnahme ermöglicht die Annahme einer umlaufenden Querkraftbelastung F_q .

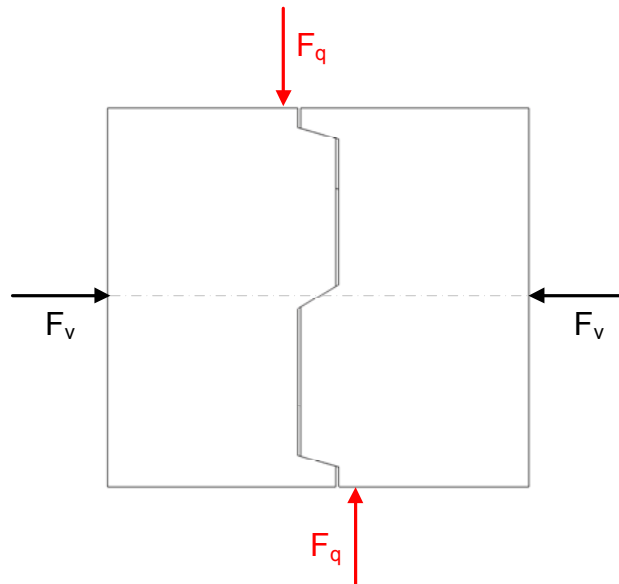


Abbildung 5-30: Füge-technik unter Vorspannung F_v und Querkraft F_q

Die **Abbildung 5-31** zeigt eine ungünstige Zahnstellung, bei dem zwei Flankenflächen der Füge-technik die gesamte Querkraftbelastung F_q aufnehmen.

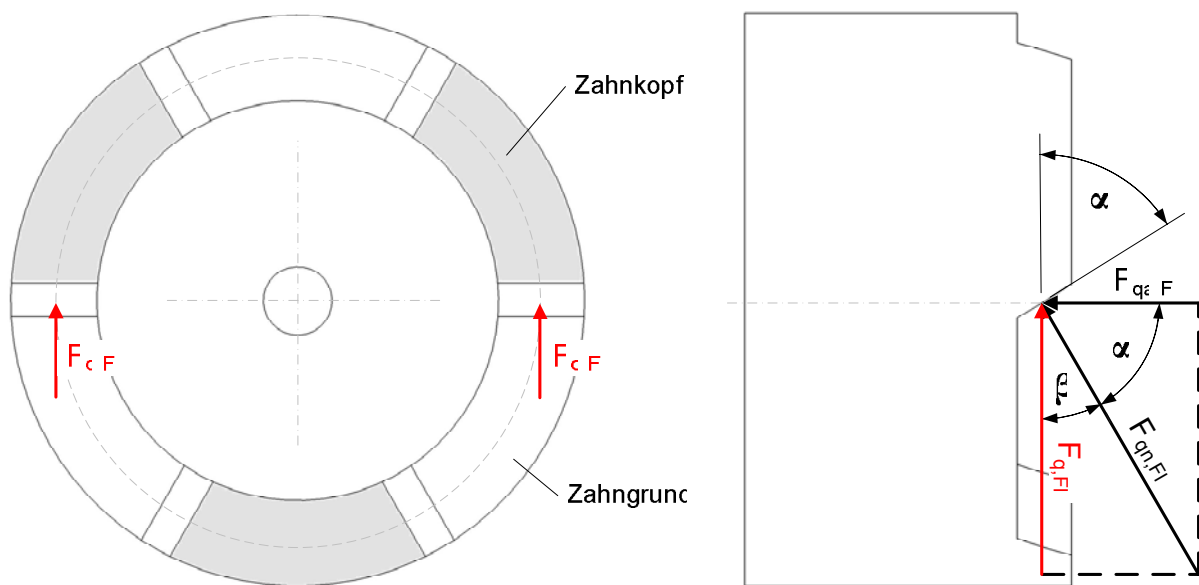


Abbildung 5-31: Querkraftbelastung F_q : ungünstige Zahnstellung sowie Kräfte an der Zahnflanke

Die auf eine Flanke wirkende Querkraft $F_{q, Fl}$ errechnet sich nach

$$F_{q, Fl} = \frac{F_q}{2}. \quad (\text{Gl. 5-18})$$

Die für die Ermittlung der Flächenpressung p_q notwendige Normalkraft $F_{qn, Fl}$ ergibt sich zu

$$F_{qn, Fl} = \frac{F_{q, Fl}}{\sin \alpha} \quad \text{mit } \alpha = \text{Flankenwinkel} \quad (\text{Gl. 5-19})$$

Damit kann die Flächenpressung p_q nach bekannter Beziehung wie folgt ermittelt werden:

$$p_q = \frac{F_{qn, Fl}}{A} \quad \text{mit } A = \text{Flankenfläche} \quad (\text{Gl. 5-20})$$

Unter Berücksichtigung der aus der Vorspannung F_v resultierenden Flächenpressung p_v ergibt sich daraus eine Gesamtflächenpressung p_{qg} . Dabei erhöht sich die Flächenpressung an jeder der beiden belasteten Zahnflanken auf

$$p_{qg} = p_v + p_q. \quad (\text{Gl. 5-21})$$

Im Gegenzug dazu werden die verbleibenden Zähne bzw. Zahnflanken entlastet. Für eine entlastete Flankenfläche soll aus Sicherheitsgründen mit folgender reduzierten Gesamtflächenpressung p_{qg} gerechnet werden:

$$p_{qg} = p_v - p_q. \quad (\text{Gl. 5-22})$$

Damit weder die zulässige Flächenpressung p_{qg} überschritten wird noch ein Auseinandergleiten der Füge-technik stattfindet, müssen folgende Auslegungskriterien erfüllt sein:

Für die belastete Zahnflanke:

$$p_{qg} \leq p_{zul} \quad (\text{Gl. 5-23})$$

Für die entlastete Zahnflanke:

$$p_{qg} > 0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 5-24})$$

Damit ein Abheben der Füge-technik in Folge der Querkraftbelastung F_q nicht eintritt, ist folgende Ungleichung (vgl. Gl. 5-8) bezüglich der Vorspannkraft F_v zu erfüllen:

$$F_v > 2 \cdot A \cdot p_q \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 5-25})$$

Die **Abbildung 5-32** zeigt die Füge-technik unter Vorspannung F_v und Biegebelastung M_b . Für die Nachrechnung der Füge-technik wird aus Gründen der Sicherheit auch hier wieder eine ungünstige Zahnstellung gegenüber der eingeleiteten Belastung gewählt. Diese Maßnahme ermöglicht die Annahme einer umlaufenden Biegebelastung M_b .

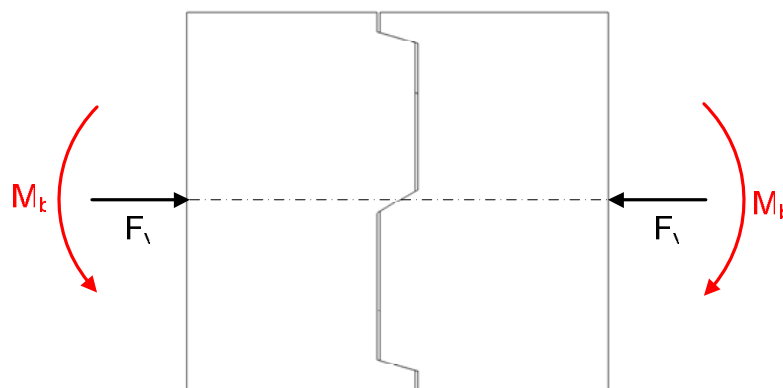


Abbildung 5-32: Füge-technik unter Vorspannung F_v und Biegebelastung M_b

Die **Abbildung 5-33** zeigt eine ungünstige Zahnstellung, bei dem der unterste Zahn der Füge-technik die gesamte Biegebelastung M_b aufnimmt.

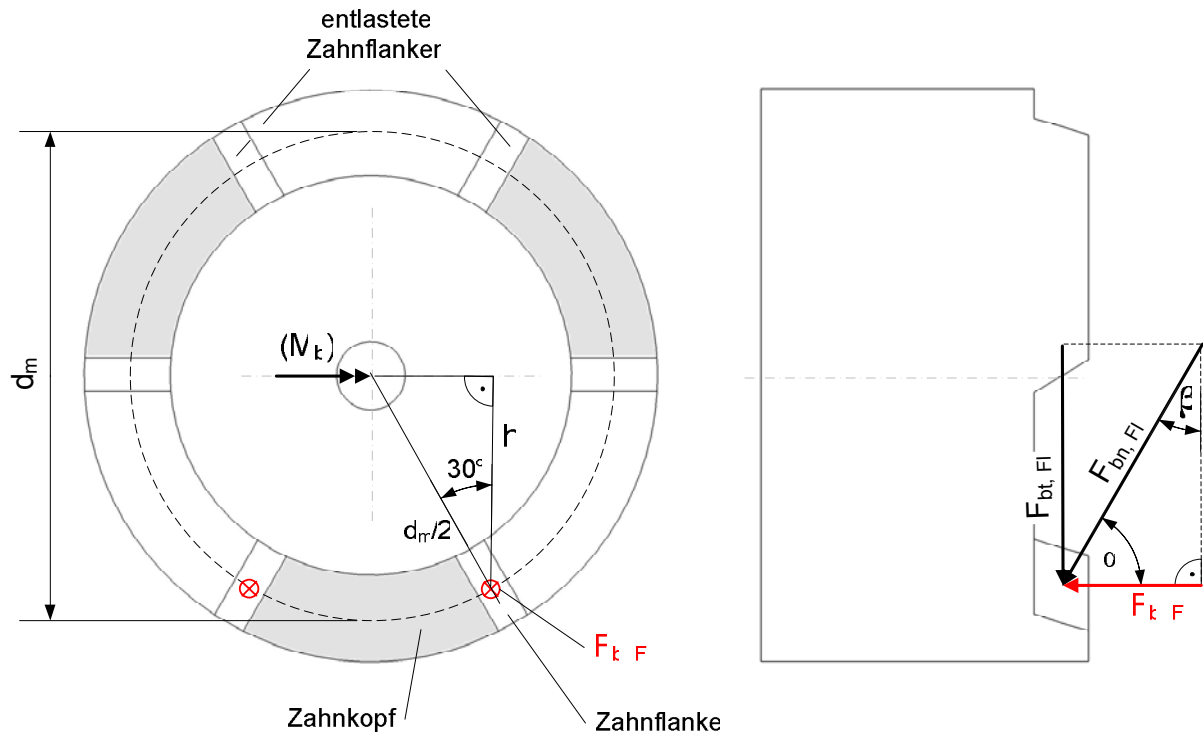


Abbildung 5-33: Biegebelastung M_b : ungünstige Zahnstellung sowie Kräfte an der Zahnflanke

Die aus der Biegebelastung M_b resultierende Biege- $kraft F_{b, Fl}$ auf eine Zahnflanke errechnet sich nach

$$F_{b, Fl} = \frac{M_b}{2 \cdot h} \quad (\text{Gl. 5-26})$$

$$\text{mit } h = \cos 30^\circ \cdot \frac{d_m}{2} \quad (\text{Gl. 5-27})$$

Die für die Flächenpressung p_b erforderliche Normalkraft $F_{bn, Fl}$ ergibt sich zu

$$F_{bn, Fl} = \frac{F_{b, Fl}}{\cos \alpha} \quad \text{mit } \alpha = \text{Flankenwinkel} \quad (\text{Gl. 5-28})$$

Damit kann die Flächenpressung p_b nach bekannter Beziehung wie folgt ermittelt werden:

$$p_b = \frac{F_{bn,Fl}}{A} \quad \text{mit } A = \text{Flankenfläche} \quad (\text{Gl. 5-29})$$

Unter Berücksichtigung der aus der Vorspannung F_v resultierenden Flächenpressung p_v ergibt sich daraus eine Gesamtflächenpressung p_{bg} . Dabei erhöht sich die Flächenpressung an beiden Zahnflanken des unteren Zahnes auf

$$p_{bg} = p_v + p_b \cdot \quad (\text{Gl. 5-30})$$

Im Gegenzug dazu, werden zwei gegenüberliegende Zahnflanken der beiden anderen Zähne um den Betrag der Flächenpressung p_b entlastet. Daraus ergibt sich für eine entlastete Zahnflanke folgende reduzierte Gesamtflächenpressung p_{bg} :

$$p_{bg} = p_v - p_b \cdot \quad (\text{Gl. 5-31})$$

Damit weder die zulässige Flächenpressung p_{bg} überschritten wird, noch ein Auseinandergleiten der Füge-technik stattfindet, müssen folgende Auslegungskriterien erfüllt sein:

Für die belasteten Zahnflanken:

$$p_{bg} \leq p_{zul} \quad (\text{Gl. 5-32})$$

Für die entlasteten Zahnflanken:

$$p_{bg} > 0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 5-33})$$

Damit ein Abheben der Füge-technik in Folge der Biegebelastung M_b nicht eintritt, ist folgende Ungleichung (vgl. Gl. 5-8) bezüglich der Vorspannkraft F_v zu erfüllen:

$$F_v > 2 \cdot A \cdot p_b \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 5-34})$$

Die Überlagerung von Belastungen kann hier erfolgen durch die Summierung der auftretenden Flächenpressungen p und der Flächenentlastungen pro Zahn bzw. Zahnflanke. Dabei ist es

möglich, dass beispielsweise in Folge einer Torsionsbelastung \mathbf{M}_t eine Zahnflanke belastet und durch Überlagerung einer angreifenden Querkraftbelastung \mathbf{F}_q zugleich entlastet wird. Dieser Belastungsfall hat zur Folge, dass an der Zahnflanke eine geminderte Flächenpressung \mathbf{p} vorliegt. Um die Sicherheit des überschlägigen Festigkeitsnachweises zu erhöhen, werden Entlastungen von belasteten Flankenflächen in Folge von Überlagerungen nicht berücksichtigt. Es erfolgt eine separate Summierung der belasteten und entlasteten Zahnflankenflächen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Vorspannkraft \mathbf{F}_v jeweils nur einmal berücksichtigt wird.

Für die belastete Zahnflanke:

$$p_g = p_v + p_t + p_q + p_b \leq p_{zul} \quad (\text{Gl. 5-35})$$

Für die entlastete Zahnflanke:

$$p_g = p_v - p_t - p_q - p_b > 0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 5-36})$$

Damit ein Abheben der Füge-technik in Folge der überlagerten Belastungen mit Sicherheit nicht eintritt, wird folgende Forderung (vgl. Gl. 5-8) bezüglich der Vorspannkraft \mathbf{F}_v formuliert:

$$F_v > 6 \cdot A \cdot p_t \cdot p_q \cdot p_b \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 5-37})$$

5.2.2.3 Vorrichtung

Die bereits mehrfach diskutierten Analogien zwischen dem MLJ-Füge- und MLJ-Vorrichtungskonzept gestatten im Folgenden eine problemlose Ableitung der entwickelten Prismenverzahnung zur Nutzung als Vorrichtung. Der Grund dafür ist, dass bereits bei der Entwicklung der Füge- und Vorrichtungsbau mit seinen Prinzipien Berücksichtigung gefunden hat (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Allein die Tatsache, den Spannvorgang als temporären reversiblen Fügeprozess anzusehen, verdeutlicht die engen Beziehungen zwischen Füge- und Vorrichtungsbau.

Die **Abbildung 5-34** zeigt eine Vorrichtung für die Fräsbearbeitung, bestehend aus der Prismenverzahnung zur Aufnahme der Bauteilschicht, sowie aus einem Befestigungssystem für den Maschinentisch und einer speziellen Spannvorrichtung zum Festhalten der Bauteilschicht während der Fräsbearbeitung. Die Lage der Vorrichtung wird mittels der Passsteine auf dem Maschinentisch der Fräsmaschine vordefiniert. Die Vorrichtung besitzt dazu auf der dem Maschinentisch zugewandten Seite zwei auf die Passsteine abgestimmte Passschlitze.

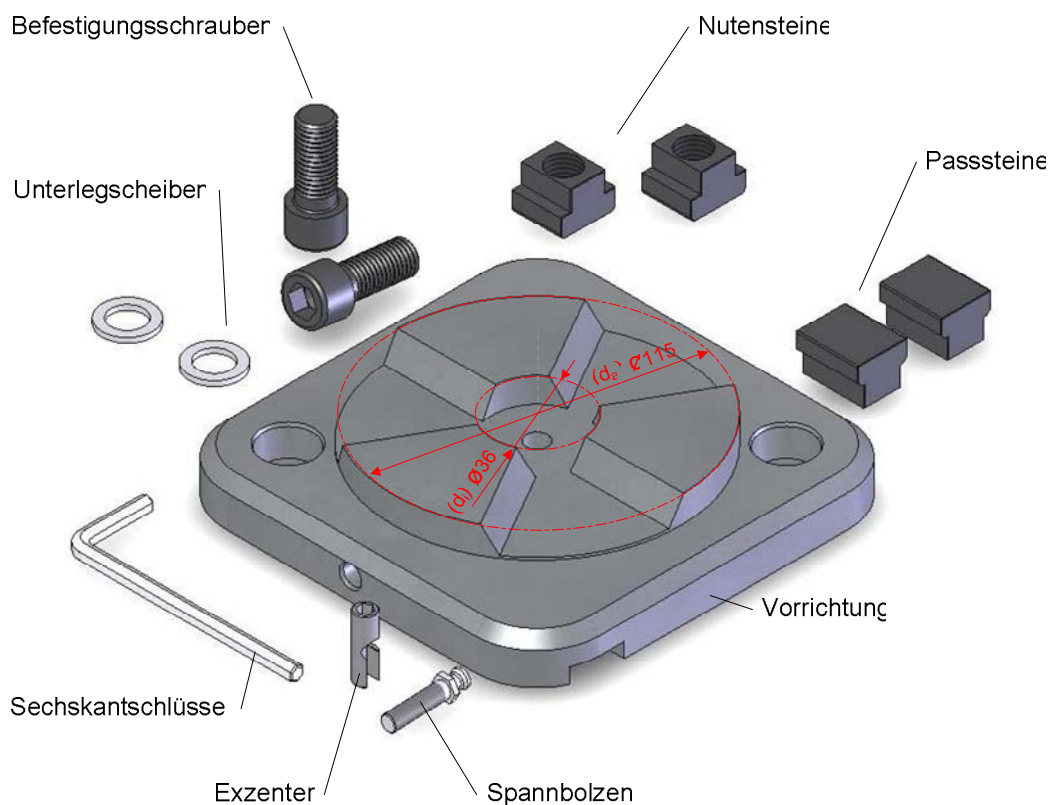


Abbildung 5-34: Vorrichtung mit Befestigungs- und Spannmittel für die Fräsbearbeitung

Mit Hilfe der Nutensteine und der dazugehörigen Befestigungsschrauben wird die Lage der Vorrichtung fixiert, so dass ein Verrutschen in Folge der auftretenden Bearbeitungskräfte verhindert wird. Die Prismenverzahnungsdurchmesser d_i und d_a der Vorrichtung wird so gestaltet, dass sie einen Spannbereich von $d_i = 36\text{mm}$ bis $d_a = 115\text{mm}$ abdecken; damit können Bauteilsichten mit unterschiedlichen Größen bzw. Prismendurchmessern aufgenommen werden.

Für die eigentliche frästechnische Bearbeitung der Bauteilschicht ist es erforderlich, dass die Zugänglichkeit des Fräasers nicht durch äußere angreifende Spannmittel, wie z.B. Spannpratzen, behindert wird. Daher muss das Aufbringen der Vorspannkraft F_p von unten aus Richtung der Vorrichtung erfolgen. Das Verspannen kann grundsätzlich über eine konventionelle Schraubverbindung realisiert werden. Jedoch sind damit Probleme in Bezug auf die Zugänglichkeit der Schraube verbunden. Um diese zu lösen, muss die Vorrichtung entweder sehr hoch gebaut oder diese zum Spannen bzw. Entspannen der Bauteilschicht montiert bzw. demontiert werden. Eine andere Möglichkeit bietet die Verwendung eines Zugexzenter, welcher die beschriebenen Nachteile behebt. Die **Abbildung 5-35** zeigt eine solche Vorrichtungsvariante mit Zugexzenter und verdeutlicht das Spannprinzip.

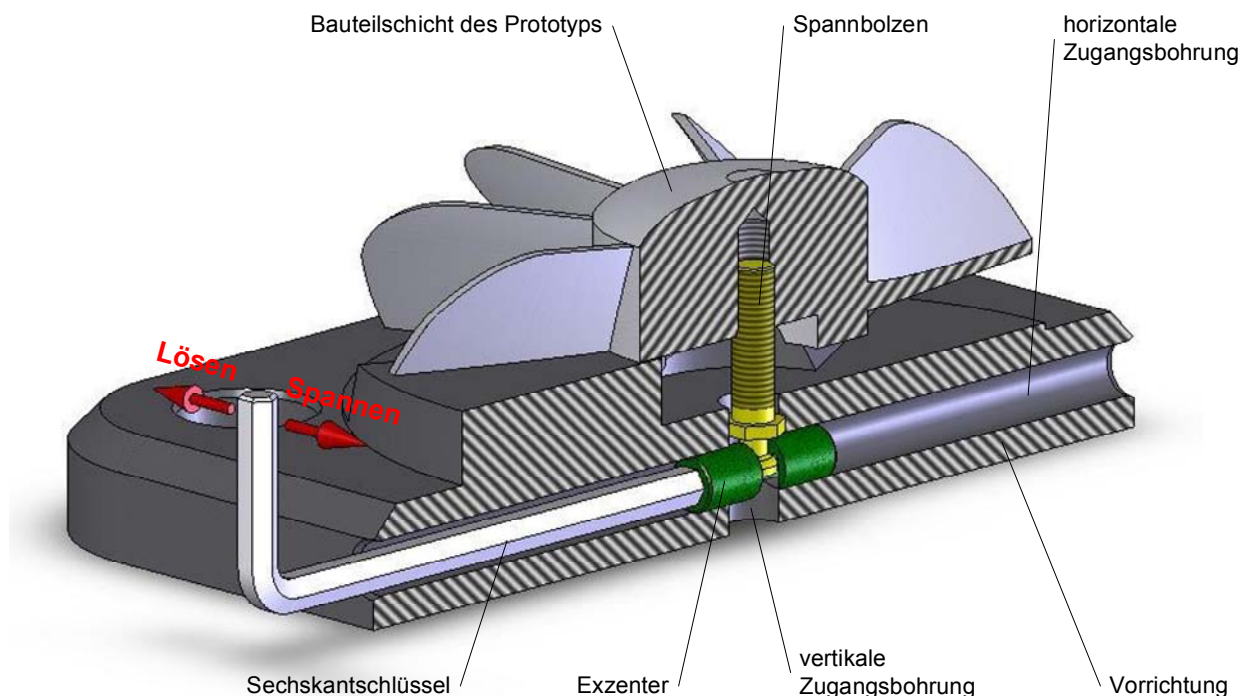


Abbildung 5-35: Spannprinzip mittels Spannbolzen und Exzenter

Für den Spannvorgang wird der Spannbolzen über ein Gewinde mit der Bauteilschicht verbunden. Im Anschluss daran wird die Bauteilschicht mit Spannbolzen auf die Prismen-

verzahnung der Vorrichtung gesetzt. Das Aufbringen der Vorspannkraft F_p wird über die Verdrehung des Exzenters vorgenommen, der über die horizontale Zugangsbohrung in der Vorrichtung mit dem Spannbolzen in Eingriff gebracht wird. Dabei wird die Bauteilschicht mit dem Spannbolzen vertikal nach unten gezogen, wodurch die Spannwirkung eingeleitet wird. Zum Erreichen einer maximalen Vorspannkraft F_p ist die Zustelltiefe des Spannbolzens über die vertikale Zugangsbohrung zum Exzenter maßgebend. Grundsätzlich können der Zugexzenter und der Spannbolzen selbst hergestellt werden. Es bietet sich jedoch an, auf die Erfahrung von Herstellern zurückzugreifen und fertige Exzenter-Spannsysteme zu verwenden. Diese verfügen neben hochfesten Materialien über gehärtete Kontaktflächen zur Minimierung des Verschleißes. Für die Vorrichtung wird das Exzenter-Spannsystem *Alufix* der Firma *Witte* verwendet. Nachteilig bei einem solchen System sind der geringe Schwenkwinkel des Exzenters und die geringe Hubhöhe. Es ist darauf zu achten, dass der Exzenter selbsthemmend ist und bei der geringen Hubhöhe der Schwenkwinkel voll ausgenutzt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die maximale Vorspannkraft F_p erreicht und aufrechterhalten wird [17].

Da seitens des Herstellers keine Angaben zur maximalen Spannkraft des Exzenter-Spannsystems vorliegen, wurde für das verwendete System 16 mit Hilfe eines Kraftaufnehmers vom Typ *Hottinger U 9A* und einem Messverstärker vom Typ *Hottinger KWS 3082* eine Exzenter-Spannkraft von 3200N ermittelt.

Die Forderung, von der Lage der Vorrichtung auf die Lage der Bauteilschicht zu schließen, wird durch die Verwendung eines Referenzkörpers mit Prismenverzahnung realisiert. Zur Positionsbestimmung wird dieser auf die Vorrichtung gesetzt und die Lage mit Hilfe eines 3D-Tasters der Fräsmaschine bestimmt. Dazu wird die umlaufende Kante des Referenzkörpers entlang der x- und der z-Achse angefahren. Dabei werden jeweils zwei Messpunkte ($x_1; x_2$ und $z_1; z_2$) aufgenommen und daraus je eine Mittellinie errechnet. Der Schnittpunkt beider Mittellinien führt zum Mittelpunkt (Referenzpunkt) des Referenzkörpers (vgl. **Abbildung 5-36**). Dieser entspricht durch die Vollzentrierung ebenso dem Mittelpunkt der Vorrichtung. Die Orientierung der Vorrichtung um den Mittelpunkt bzw. um die Zentrierachse ist bereits durch die Verwendung von Passsteinen während des Aufspannens auf dem Maschinentisch definiert worden.

Die Nutzung der Prismenverzahnung als Spanntechnik während der Drehbearbeitung bedingt ebenso das Vorhandensein einer Vorrichtung wie bei der Fräsbearbeitung. Zur Aufnahme von Bauteilschichten in eine Drehmaschine kann als Vorrichtung der bereits vorgestellte Referenzkörper mit Prismenverzahnung verwendet werden. Dieser eignet sich durch seine äußere zylindrische Gestalt im besonderen Maße für die zentrische Aufnahme in ein Dreibackenfutter.

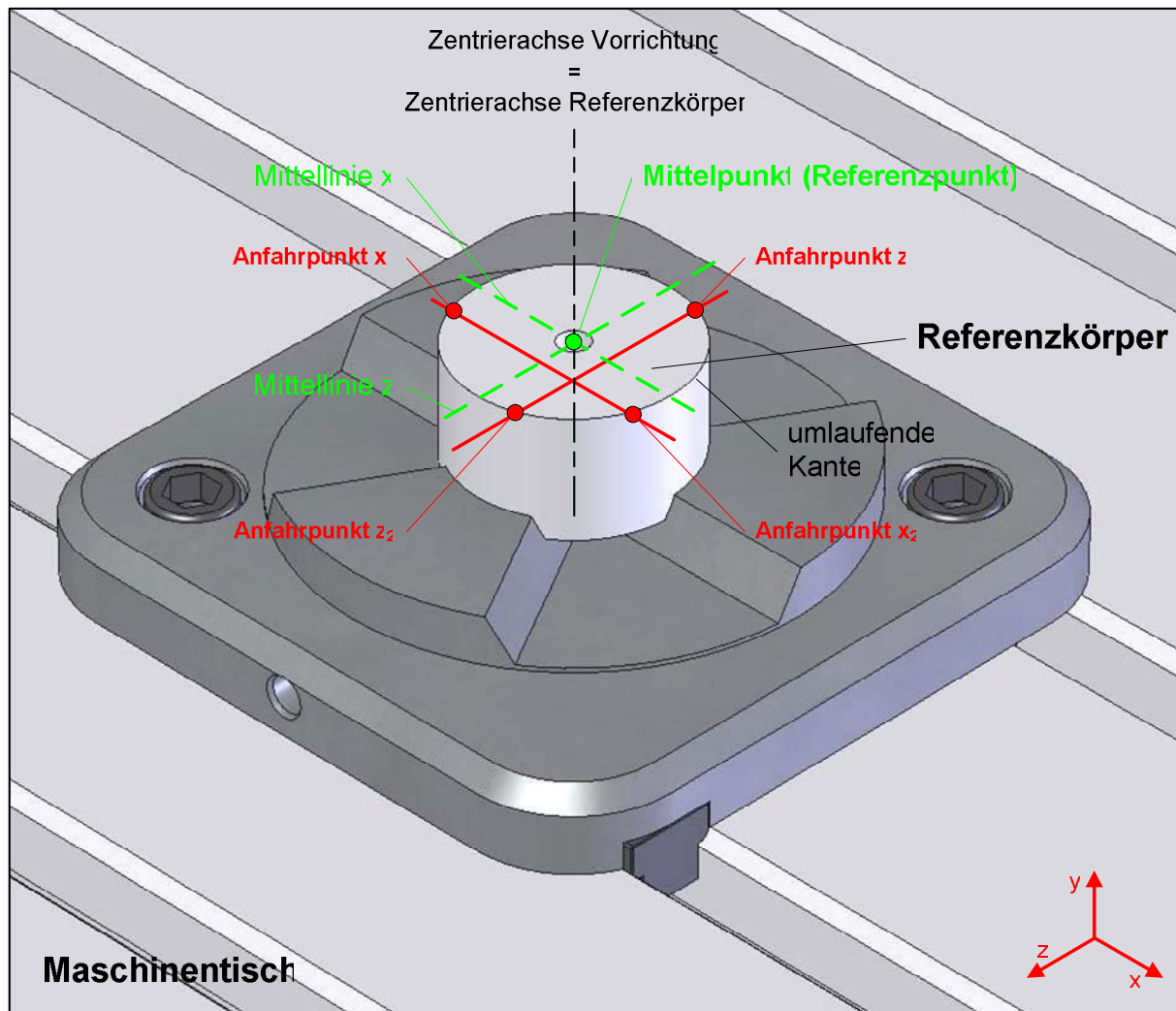


Abbildung 5-36: Einmessen der Vorrichtung mittels Referenzkörper

Das Dreibackenfutter zentriert den Referenzkörper zur Drehachse der Drehmaschine. Die Vollzentrierung der Prismenverzahnung zwischen Referenzkörper und Bauteilschicht ermöglicht eine Überlagerung der Zentrierachse mit der Drehachse des Dreibackenfutters. Damit ist die für eine Drehbearbeitung notwendige zentrische Aufnahme der Bauteilschicht zur Drehachse der Drehmaschine sichergestellt. Ein Einmessen der Vorrichtung wie bei der Fräsbearbeitung ist nicht notwendig (vgl. **Abbildung 5-37**).

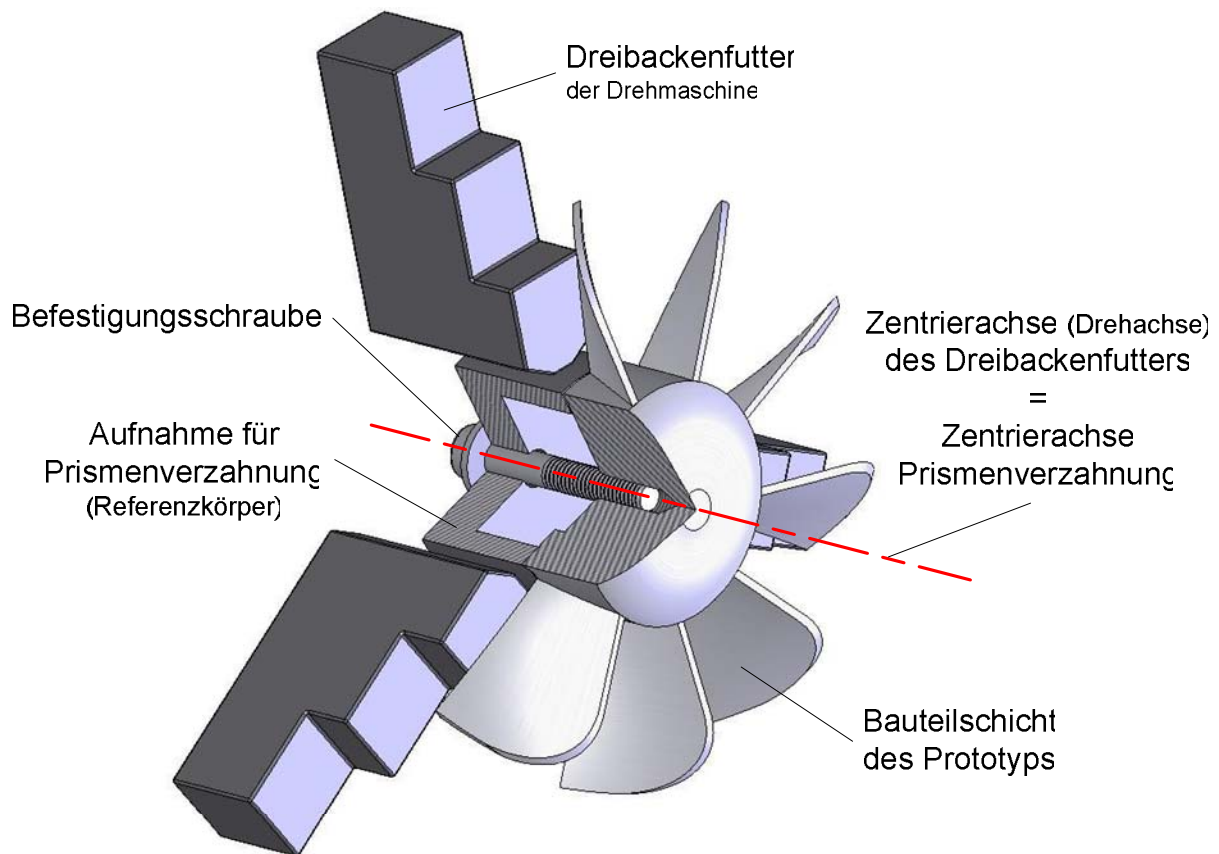


Abbildung 5-37: Drehbearbeitung: zentrisches Spannen mittels Referenzkörper und Prismenverzahnung

Bei genauerer Analyse der in Abbildung 5-37 gezeigten Bauteilschicht ergeben sich Probleme beim Aufnehmen in einer Drehmaschine mittels konventionellen Spannmitteln. Bedingt durch die Geometrie der Bauteilschicht ist beispielsweise die Verwendung eines Dreibackenfutters nicht ohne weiteres möglich. Dies verdeutlicht sich insbesondere im Hinblick auf die komplexe Form der Flügel, welche das Aufbringen von äußeren Spannkraften verhindern. Auch das Spannen auf einem Innendurchmesser ist bei der gegebenen Geometrie nicht möglich.

In der Praxis werden zum Spannen solcher Geometrien so genannte Planscheiben benutzt. Das Befestigen und zentrische Ausrichten der zu bearbeitenden Bauteile auf der Planscheibe ist jedoch mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Die Verwendung einer Prismenverzahnung zum Spannen komplexer Geometrien stellt hier eine grundsätzliche Lösung dar.

5.3 Programm-Modul zur rechnerunterstützten Auslegung

Die Umsetzung des Programm-Moduls erfolgt am Beispiel der Prismenverzahnung. Der Grund liegt in der gegenüber der Bohrung-Zapfen-Kombination deutlich komplexeren Geometrie und dem damit verbundenen aufwendigeren Festigkeitsnachweis. Im Folgenden wird zum besseren Verständnis zuerst der Leistungsumfang des Moduls beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt die Darstellung des allgemeinen Aufbaus und abschließend die programmiertechnische Umsetzung sowie die Integration des Moduls in die CAD-Umgebung.

5.3.1 Leistungsumfang

Aus funktionaler Sicht hat das Modul die Aufgabe, einen Festigkeitsnachweis für die Prismenverzahnung durchzuführen. Dazu sind die aus Kapitel 5.2.2.2 formulierten Berechnungsformeln zu implementieren. Neben der genannten Hauptfunktionalität sind zudem Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit gestellt, welche eine Integration in ein CAD-System sinnvoll erscheinen lassen. Dazu wird das Programm-Modul in die Benutzeroberfläche des CAD-Systems eingebunden. Dies geschieht durch Hinzufügen eines neuen Icons „Prismen-Verzahnung“ innerhalb der Menüleiste des CAD-Systems.

Für eine sinnvolle Nutzung des Programm-Moduls in der Praxis wird neben der rechnerunterstützten Auslegung eine Funktion angeboten zum Einfügen der Prismenverzahnung sowie zum Trennen des CAD-Modells des herzustellenden Prototyps in einzelne Bauteilschichten. Der Grund dafür ist, dass die in Kapitel 2.2.2 beschriebene automatisierte Verfahrensweise zum Trennen und Einfügen der Bohrung-Zapfen-Kombination für die Prismenverzahnung nicht genutzt werden kann. Dies ist mit der Geometrie der Prismenverzahnung zu begründen, was zum Ende des Kapitels eingehend diskutiert wird.

Unter Berücksichtigung der erweiterten Funktionalität des Programm-Moduls ergeben sich aus der Anwendersicht für den Benutzer folgende abzuarbeitende Teilprozesse, welche durch das Programm-Modul unterstützt werden:

- **Positionsangaben** zum Einfügen der Prismenverzahnung in das CAD-Modell
- **Geometrieangaben** zur Prismenverzahnung

- **Festigkeitsnachweis** der Prismenverzahnung
- **Einfügen** der Prismenverzahnung, **Trennen** des CAD-Modells und **Speichern** der Bauteilschichten mit Prismenverzahnung

Im Folgenden wird anhand der genannten Teilprozesse der Leitungsumfang des Programm-Moduls erläutert. Ausgangssituation für die Nutzung des Programm-Moduls ist ein im CAD-System geöffnetes Einzelteil des herzustellenden Prototyps. Die Aktivierung des Programm-Moduls wird über einen Auswahl-Button in der Menüleiste des CAD-Systems vorgenommen.

Teilprozess: Positionsangaben

Im ersten Schritt werden vom Benutzer die Trennebenen angegeben, an denen das CAD-Modell durchgeschnitten werden soll. Mit der Anzahl der Trennebenen wird automatisch die Anzahl der einzufügenden Prismenverzahnungen festgelegt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Hinterschneidungsanalyse zum automatischen Einfügen von Trennebenen nicht vorliegt. Zum Setzen der Trennebenen werden am CAD-Modell Referenzflächen bzw. -ebenen definiert, welche vom Programm-Modul erkannt werden. Die einzufügenden Trennebenen werden dann als Offset⁶ in einem vom Benutzer selbst definierten Abstand angegeben, bezogen auf die Referenzflächen bzw. -ebenen. Liegen keine geeignete Referenzflächen bzw. -ebenen vor, so sind diese dem CAD-Modell mittels der Funktionalitäten des CAD-Systems hinzuzufügen.

Das Positionieren der Prismenverzahnung auf der jeweiligen Trennebene geschieht durch Einfügen einer Referenzachse in das CAD-Modell. Die Position ergibt sich dabei aus dem Schnittpunkt zwischen der Trennebene und der Referenzachse. Dabei ist darauf zu achten, dass die Referenzachse senkrecht auf der Trennebene steht. Die Referenzachse entspricht der Mittel- bzw. Zentrierachse der Prismenverzahnung. Liegen Trennebenen unterschiedlicher Ausrichtung vor oder liegen die einzufügenden Prismenverzahnungen nicht auf einer gemeinsamen Referenzachse, so sind entsprechende Referenzachsen zu definieren.

Um den Grad der Flexibilität zu erhöhen, kann die Orientierung der Prismenverzahnung um die Referenzachse durch Angabe eines Drehwinkels vorgegeben werden. Dazu wird eine

⁶ Offset: Parallel im Abstand x zu einem bereits bestehenden Element (z.B. Fläche, Ebene)

Verzahnungs-Bezugsebene definiert, welche die Position eines Prismenzahnes auf der Trennebene angibt und senkrecht darauf steht. Durch die Eingabe eines Winkels wird die Verzahnungs-Bezugsebene um die Referenzachse gedreht. Die **Abbildung 5-38** verdeutlicht den beschriebenen Sachverhalt an einem einfachen Beispiel eines kreiszylindrischen Körpers mit einer Trennebene.

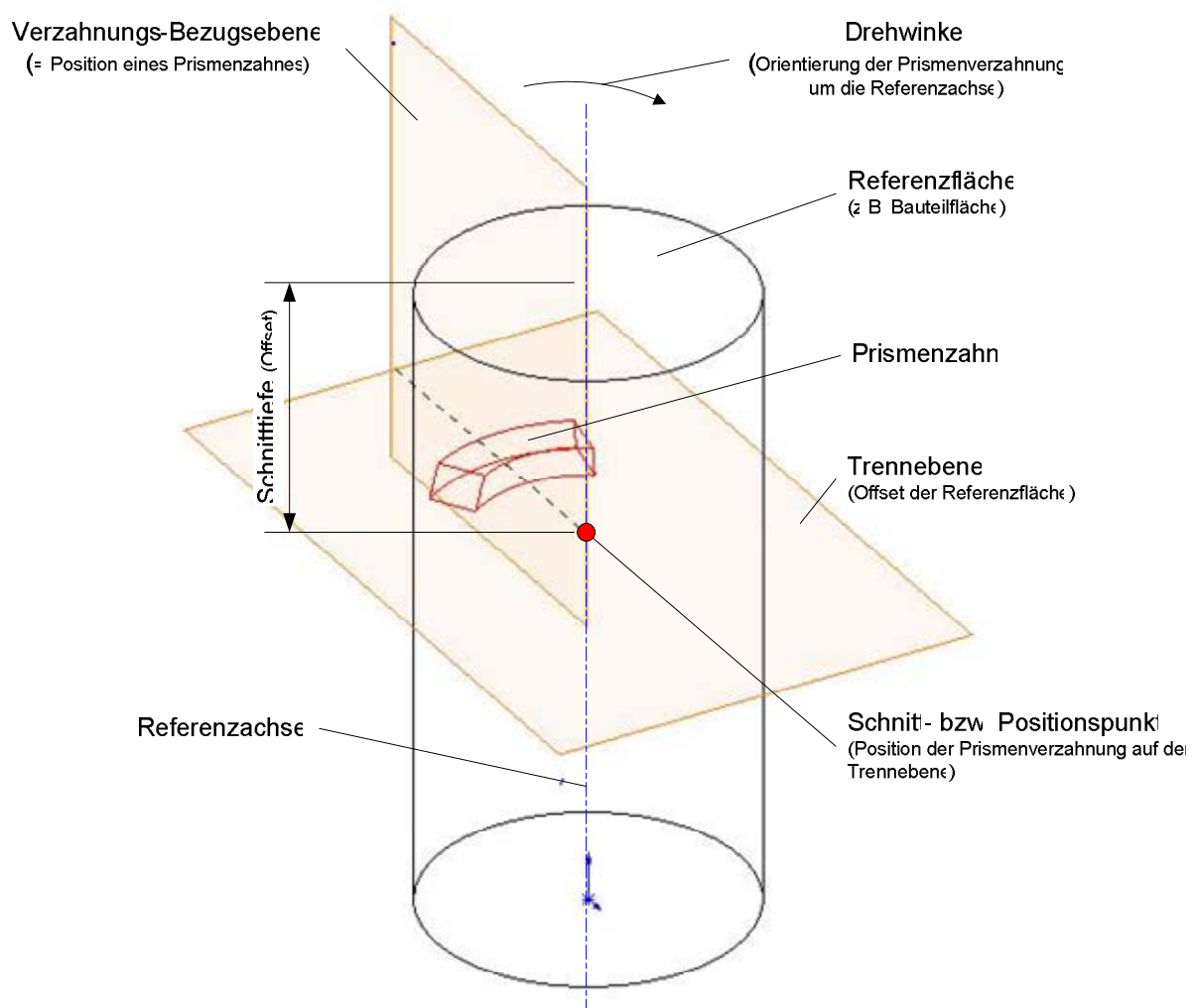


Abbildung 5-38: Positionierung der Prismenverzahnung

Zu erkennen ist die Trennebene, welche in einem definierten Abstand, der angegebenen Schnitttiefe, parallel (Offset) zur Referenzfläche liegt. Der Schnittpunkt zwischen Referenzachse und Trennebene ergibt die Position der Prismenverzahnung auf der Trennebene. Die Orientierung wird durch die Verzahnungs-Bezugsebene und den Drehwinkel festgelegt.

Die **Abbildung 5-39** zeigt die vom Programm-Modul zur Unterstützung des Teilprozesses „Positionsangaben“ bereitgestellten Funktionen.

Funktion	Beschreibung
Trennebenen-Auswahl	Legt die Referenzebenen der Prismenverzahnungen fest.
Referenzachsen-Auswahl	Legt die Positionen der Mittelachsen der Prismenverzahnungen bezogen auf die Referenzebenen fest.
Schnitttiefen [mm]	Legt Abstände bezogen auf die Referenzebenen fest, in der die Prismenverzahnungen im Prototyp eingefügt werden sollen.
Verzahnungs-Bezugsebene	Gibt die Lage eines Prismenzahnes auf den Trennebenen an.
Drehwinkel [°]	Legt die Orientierung der Prismenverzahnungen um die jeweiligen Rotationsachsen fest.

Abbildung 5-39: Funktionsübersicht zum Teilprozess „Positionsangaben“

Teilprozess: Geometrieangaben

Die Abmessungen der Prismenverzahnung werden durch die Eingabe von Geometriemerkmalen definiert. Es besteht die Möglichkeit, die Abmessungen der Prismenverzahnung für jede Trennebene individuell festzulegen. Die eingegebenen Geometriemerkmale braucht man einerseits für den späteren Festigkeitsnachweis und andererseits für das automatische Einfügen der Prismenverzahnung sowie die Trennung des CAD-Modells in einzelne Bauteilschichten.

Die **Abbildung 5-40** zeigt die vom Programm-Modul zur Unterstützung des Teilprozesses „Geometrieangaben“ bereitgestellten Funktionen. Nicht enthalten in dem Funktionsumfang des Programm-Moduls ist die Angabe über das Einfügen von Bohrungen, wie beispielsweise einer Zentralbohrung für die Schraubverbindung. Der Grund hierfür liegt darin, dass die gängigen 3D-CAD-Systeme heute über so genannte Bohrungsassistenten verfügen, mit denen Bauteile komfortabel mit unterschiedlichen Bohrungsformen, wie z.B. Durchgangsbohrungen oder Sachbohrungen, versehen werden können. Für das spätere Einfügen von Bohrungen ist auf die Funktionalität des CAD-Systems zurückzugreifen.

Funktion	Beschreibung
Zähnezahl	Legt die Zähnezahl der Prismenverzahnung fest. Diese ist standardmäßig auf $z = 3$ voreingestellt.
Flankenwinkel [°]	Legt den Flankenwinkel der Zähne fest.
Zahnhöhe [mm]	Legt die Zahnhöhe (Abstand: Zahnfuß – Zahnkopf) fest.
Spitzenrücknahme [mm]	Rücknahme des Zahnkopfes, zur Sicherstellung der Flankenzentrierung
Innendurchmesser [mm]	Legt den inneren Durchmesser der Prismenverzahnung fest.
Außendurchmesser [mm]	Legt den äußeren Durchmesser der Prismenverzahnung fest.
Fräserauslauf [mm]	Legt den Freischnitt für das Fräswerkzeug fest.

Abbildung 5-40: Funktionsübersicht zum Teilprozess „Geometrieangaben“

Der Fräserauslauf stellt als Geometriemerkmal einen Sonderfall dar, da er nicht direkt der Geometrie der Prismenverzahnung zugeordnet werden kann. Er ist anzugeben, wenn der Außendurchmesser der Prismenverzahnung kleiner als die äußeren Abmaße des Prototyps in der Trennebene ist. Die **Abbildung 5-41** verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel eines Zylinders, bei dem der Durchmesser größer als der Außendurchmesser der Prismenverzahnung ist.

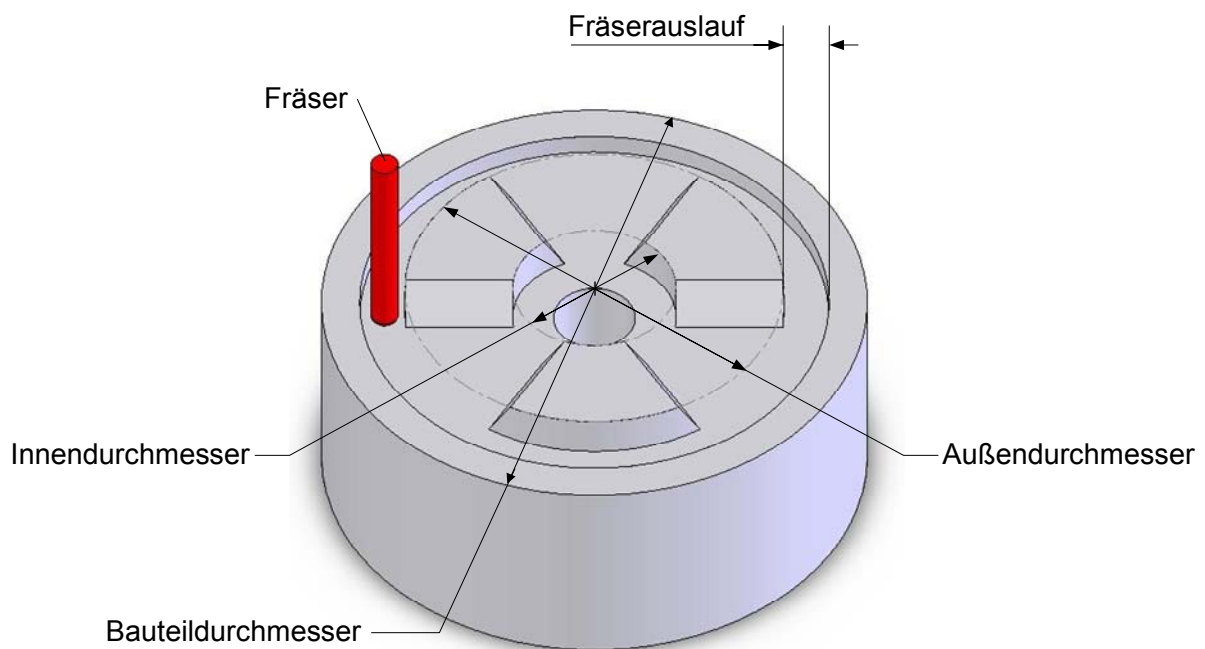


Abbildung 5-41: Prismenverzahnung mit Fräserauslauf

Der Fräserauslauf ist so zu wählen, dass der Fräser sich bei der Herstellung der Verzahnung freischneiden kann. Auf diese Weise wird ein korrektes Herausarbeiten der Prismenzähne gewährleistet.

Teilprozess: Festigkeitsnachweis

Da die Geometrie der Prismenverzahnung sowie die auftretenden mechanischen Belastungen grundsätzlich in jeder Trennebene unterschiedlich sein können, kann für jede Trennebene durch Angabe der Trennebenenummer ein separater Festigkeitsnachweis durchgeführt werden. Dazu werden die bereits im Teilprozess „Geometrieangaben“ angegebenen Geometriemerkmale der Prismenverzahnungen herangezogen

Die auftretenden mechanischen Belastungen in der Trennebene können in Form eines Belastungskollektivs angegeben werden. Dieses setzt sich im allgemeinen Fall aus der Torsions-, Querkraft- und Biegebelastung zusammen. Nicht auftretende mechanische Belastungen werden zu Null gesetzt. Weiterhin sind Angaben erforderlich zu der zulässigen Flächenpressung p_{zul} des Prismenverzahnungswerkstoffs, dem Flächentraganteil der Zahnflanken und dem Sicherheitsfaktor für den Festigkeitsnachweis.

Als Rückgabewert erhält der Anwender die auftretende maximale Flächenpressung p an den Zahnflanken der Prismenverzahnung sowie die erforderliche mindest Vorspannkraft F_{sp} der Schraubverbindung. Zudem wird der Benutzer durch einen Vergleich der zulässigen Flächenpressung p_{zul} und der auftretenden Flächenpressung p über eine ausreichende bzw. nicht ausreichende Dimensionierung der Prismenverzahnung informiert. Liegt beispielsweise keine ausreichende Dimensionierung vor, so können die Geometriemerkmale aus dem Teilprozess „Geometrieangaben“ nachträglich verändert werden. Die Festigkeitsberechnung wird dann anhand der neuen Geometriemerkmale automatisch aktualisiert. Bei vorgegebenem Werkstoff kann auf diese Weise durch Variation der Geometriemerkmale und Überprüfung des Festigkeitsnachweises iterativ die optimale Geometrie der Prismenverzahnung bestimmt werden.

Die minimale Vorspannkraft F_{sp} dient als Eingangsgröße für die Auslegung der Schraubverbindung. In Abhängigkeit vom Sicherheitsfaktor für den Festigkeitsnachweis ist diese jedoch höher zu wählen. Da eine höher gewählte Vorspannkraft F_{sp} auch eine Erhöhung der Flächenpressung p bewirkt, ist eine erneute Durchführung des Festigkeitsnachweises notwendig.

Dies wird durch die Eingabemöglichkeit einer vom Benutzer definierten Vorspannkraft F_{sp} realisiert. Nach der Eingabe wird der Festigkeitsnachweis unter Berücksichtigung des Belastungskollektivs automatisch aktualisiert.

Die **Abbildung 5-42** zeigt die vom Programm-Modul zur Unterstützung des Teilprozesses „Festigkeitsnachweis“ bereitgestellten Funktionen.

Funktion	Beschreibung
Trennebenennummer	Legt den Schnitt fest, der berechnet werden soll.
Torsionsbelastung M_t [Nm]	Legt das zu übertragende Torsionsmoment fest.
Querkraftbelastung F_q [N]	Legt die zu übertragende Querkraft fest.
Biegebelastung M_b [Nm]	Legt das zu übertragende Biegemoment fest.
Zulässige Flächenpressung p_{zul} [N/mm ²]	Legt den Werkstoff der Prismenverzahnung fest.
Sicherheitsfaktor	Legt die Sicherheit des Festigkeitsnachweises fest.
Flächentraganteil [%]	Legt den Flächentraganteil der Zahnflanken der Prismenverzahnung fest. Der Wert ist standardmäßig für gefräste Flächen auf 65% eingestellt.
Tatsächliche Vorspannkraft F_{sp} [N]	vom Anwender festgelegte Vorspannkraft

Abbildung 5-42: Funktionsübersicht zum Teilprozess „Festigkeitsnachweis“

Teilprozess: Einfügen, Trennen und Speichern

Der letzte Teilprozess beinhaltet das Einfügen der Prismenverzahnungen sowie das Trennen des CAD-Modells. Dazu ist es erforderlich, dass zuvor die Teilprozesse „Positionsangaben“ und „Geometrieangaben“ vom Benutzer abgearbeitet worden sind. Durch Bestätigung des OK-Buttons wird der Teilprozess automatisch ausgelöst. Dazu wird zuerst eine Sicherungskopie des CAD-Modells angelegt und in dem selben Verzeichnis abgelegt, in dem sich die Ausgangsdatei befindet. Im Anschluss wird das Einfügen der Prismenverzahnungen und das Trennen des CAD-Modells realisiert. Die dabei entstehenden Bauteilschichten mit Prismenverzahnungen werden ebenfalls im Arbeitsverzeichnis abgelegt. Die **Abbildung 5-43** zeigt die dabei entstehende Dateistruktur am Beispiel einer Quelldatei namens „Prototyp.CAD-Datei“, welche die Geometrie des herzustellenden Prototyps beinhaltet.

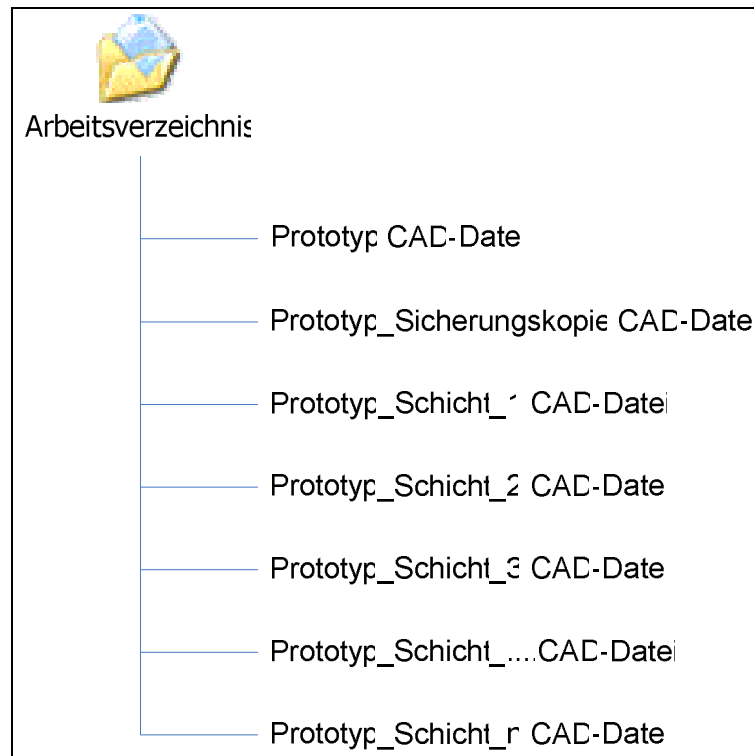


Abbildung 5-43: Dateistruktur ausgehend von der Quelldatei „Prototyp.CAD-Datei“

Das Programm-Modul bietet die Möglichkeit, die Prismenverzahnung der aktuellen Trennebene zu modifizieren. Dazu wird nach dem Einfügen der ersten Prismenverzahnungshälfte in die aktuelle Trennebene die Ausführung des Programm-Moduls angehalten. An dieser Stelle kann der Benutzer durch eine Variation der Geometriemerkmale die Prismenverzahnung seinen Bedürfnissen anpassen. Änderungen führen zu einer automatischen Aktualisierung der Prismenverzahnungsgeometrie in der aktuellen Trennebene. Der Benutzer hat hier die Möglichkeit, eine optische Kontrolle der von ihm definierten Prismenverzahnung durchzuführen. Durch Bestätigen des Buttons „Weiterzeichnen“ wird im Programm-Modul fortgefahren und die aktuellen Geometriemerkmale für die zweite Prismenverzahnungshälfte werden übernommen. Zudem besteht die Möglichkeit, den gesamten Teilprozess abubrechen.

Im Gegensatz zur der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Verfahrensweise, bei der vollautomatisiert der Prototyp zuerst in einzelne Bauteilschichten getrennt wird und diese dann um die Bohrung-Zapfen-Kombinationen ergänzt werden, sind bei der Nutzung der Prismenverzahnung die Teilschritte „Trennen“ und „Einfügen“ zu vertauschen. Das muss deshalb so sein, weil die Prismenverzahnung aufgrund ihrer Geometrie keine ebene Schnittfläche aufweist. Der Sachverhalt wird im Folgenden an einem einfachen Beispiel verdeutlicht. Die **Abbildung 5-44**

zeigt einen Kreiszylinder, bestehend aus einer Bauteilschicht A und einer Bauteilschicht B mit Prismenverzahnung.

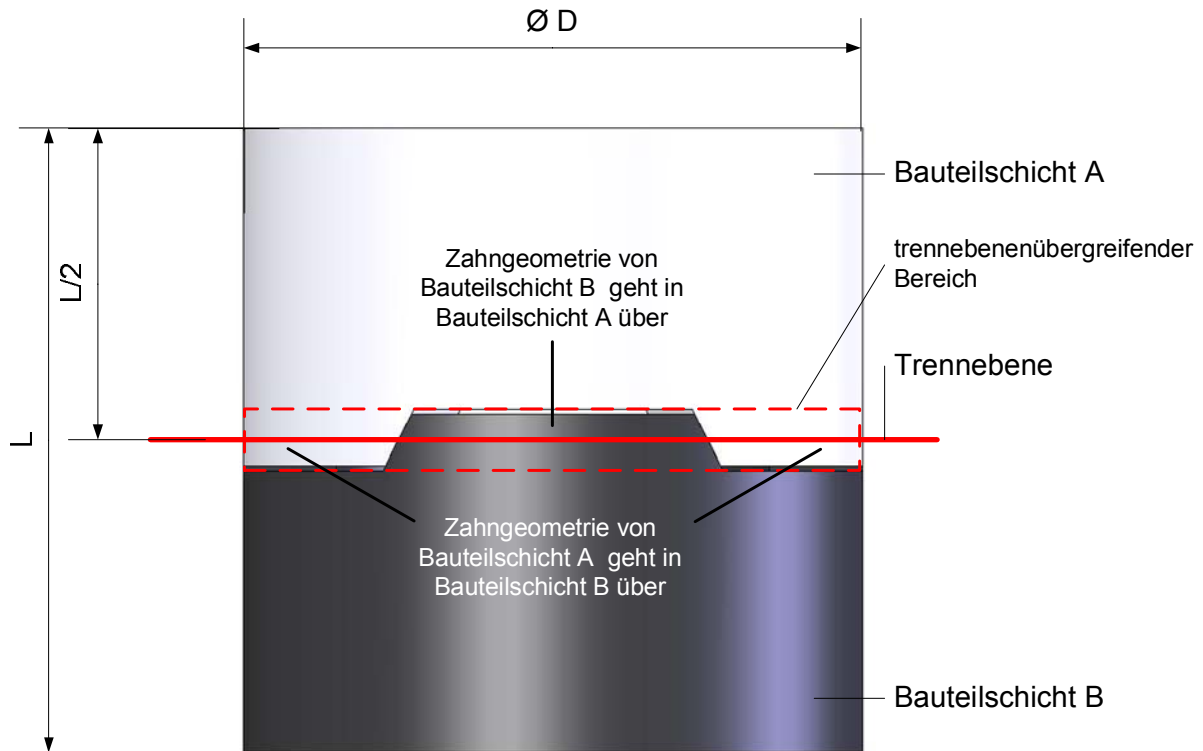


Abbildung 5-44: Problematik des trennebenenübergreifenden Bereichs

Die in der Trennebene eingefügte Prismenverzahnung ist trennebenenübergreifend. Das heißt, dass die Prismenzähne von Bauteilschicht A wie auch von Bauteilschicht B über die Trennebene in die jeweils andere Bauteilschicht übergehen und damit einen Teil der dort äußeren zylindrischen Geometrie darstellen. Wenn zuerst der Zylinder getrennt würde und anschließend um die Prismenverzahnung ergänzt, so hätte dies grundsätzlich einen Verlust der Geometrieinformation in dem trennebenenübergreifenden Bereich zur Folge. Dieser Sachverhalt wird vor allem dann bedeutsam, wenn der Prototyp über eine gemäß der **Abbildung 5-45** äußere komplexe Geometrie verfügt.

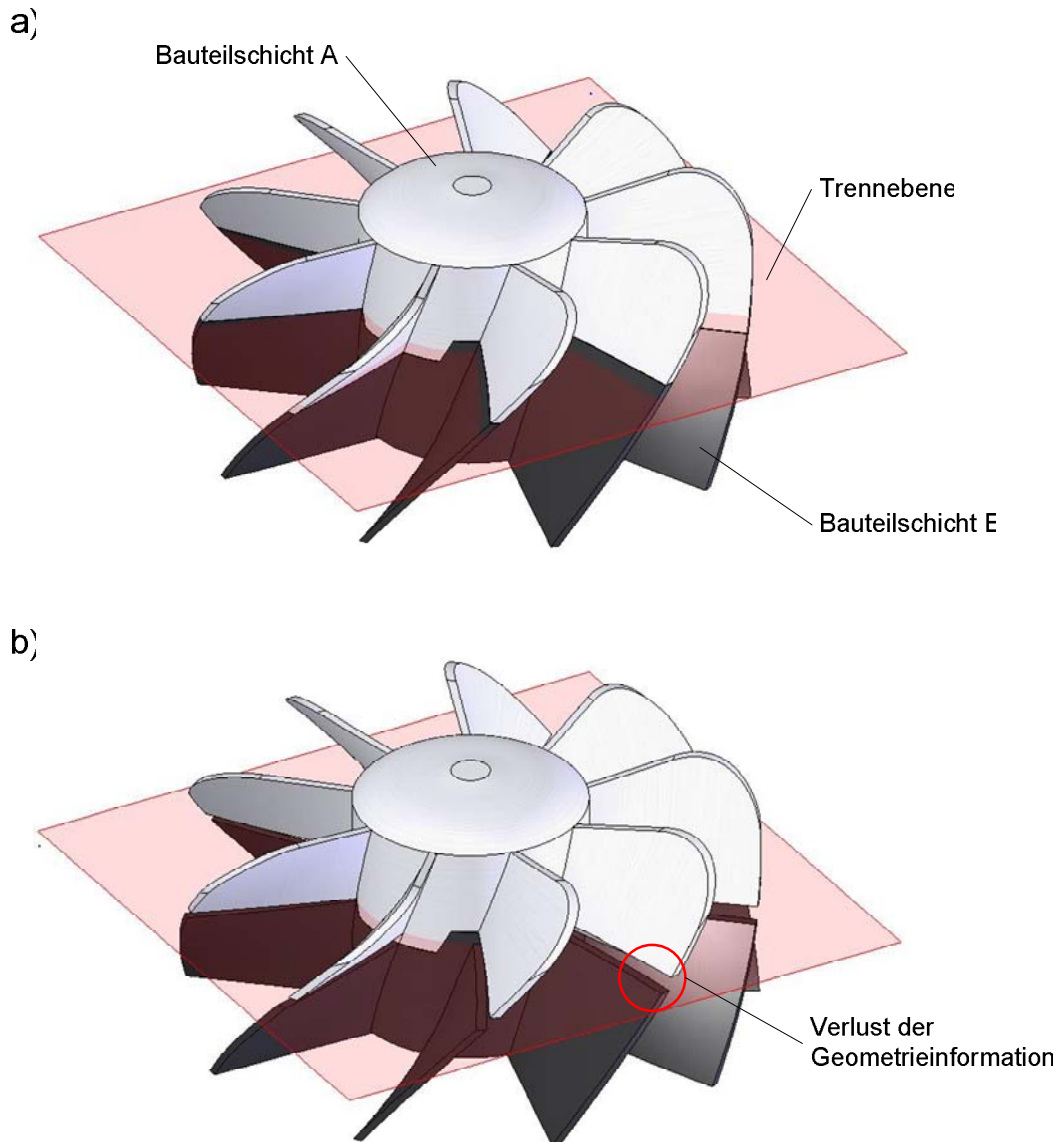


Abbildung 5-45: Prototyp a) Teilschritt: Einfügen & Trennen, b) Teilschritt: Trennen & Einfügen

Im Folgenden wird die prinzipielle Arbeitsweise des Programmmoduls zum Einfügen der Prismenverzahnungen und Trennen in einzelne Bauteilschichten anhand der **Abbildung 5-46** erläutert. Ausgangssituation ist der bereits aus der Abbildung 5-44 bekannte einfache zylindrische Körper mit einer Trennebene. Im ersten Schritt wird die Erstellung der ersten Bauteilschicht vorgenommen. Dazu wird zuerst die Prismenverzahnung erzeugt und im Anschluss daran der Prototyp getrennt. Die Durchführung geschieht im Wesentlichen mit Hilfe Boolescher Operationen. Für die Erzeugung der Prismenverzahnung wird im Bereich der Trennebene die Geometrie einer Zahnücke vom Programm-Modul erstellt und vom Gesamtmodell des Prototyps subtrahiert.

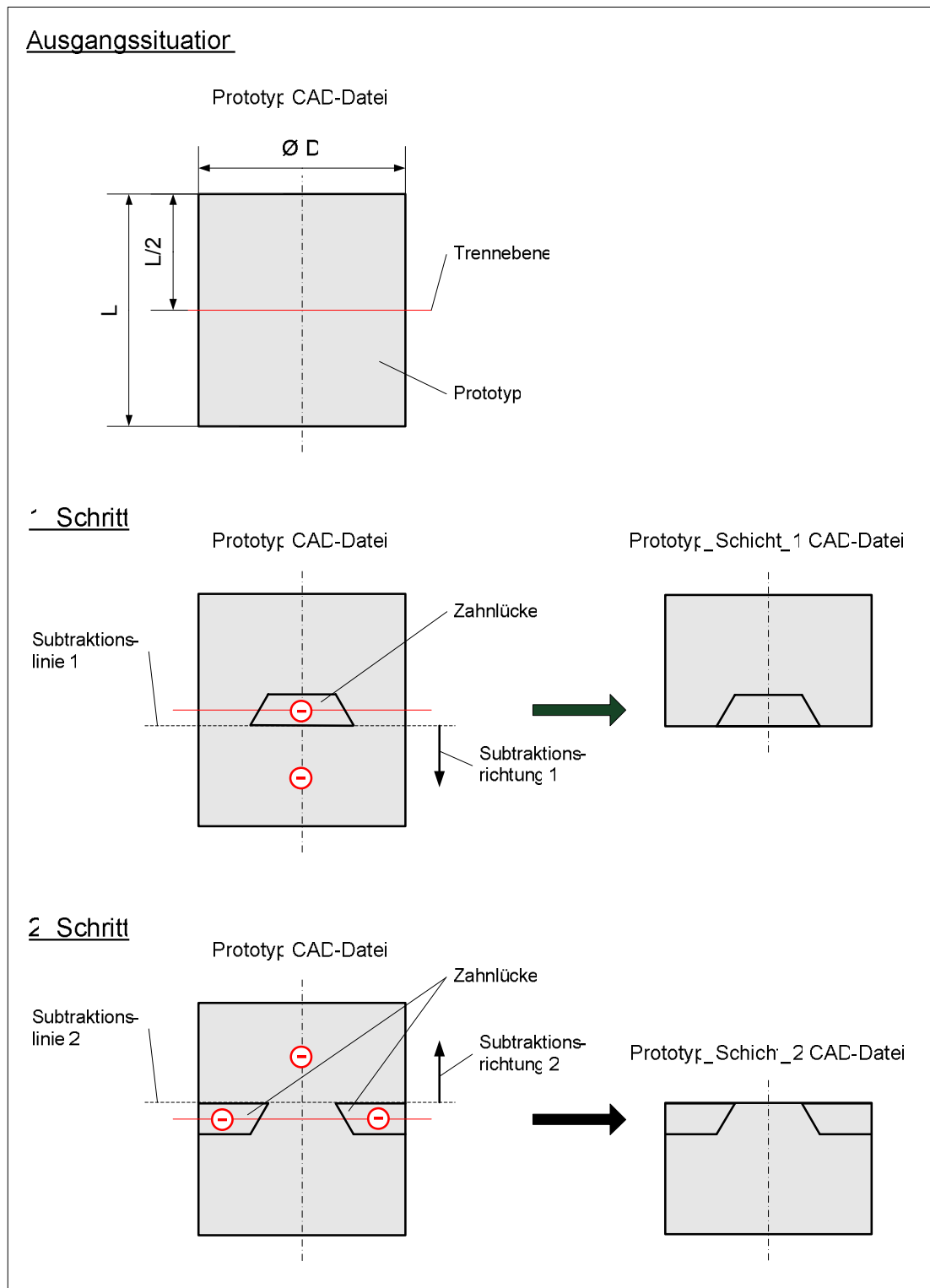


Abbildung 5-46: Prinzipdarstellung: Einfügen der Prismenverzahnung und Trennen des Prototyps

Im Anschluss daran wird die Zahnlücke gemäß der angegebenen Zähnezahl um die Referenzachse gemustert bzw. vervielfältigt. Für die Separierung der ersten Bauteilschicht vom

Rest-Modell des Prototyps wird unterhalb der Subtraktionslinie 1 (vgl. Subtraktionsrichtung 1) ebenfalls mittels Boolescher Operationen der nicht zur ersten Bauteilschicht gehörende Körper abgezogen. Auf diese Weise wird die erste Bauteilschicht vom verbleibenden Modellkörper getrennt. Die dabei entstehende Bauteilschicht wird gemäß der Dateistruktur (vgl. Abbildung 5-43) unter dem Dateinamen „Prototyp_Schicht_1.CAD-Datei“ abgespeichert.

Im zweiten und letzten Schritt wird die Erstellung der letzten Bauteilschicht realisiert. Dazu wird auf das Ausgangsmodell des Prototyps (Prototyp.CAD-Datei) zurückgegriffen und die gleiche Verfahrensweise wie beim ersten Schritt angewendet. Damit jedoch gewährleistet wird, dass die Bauteilschicht 2 exakt auf die Bauteilschicht 1 abgestimmt ist, wird zum einen die Geometrieerstellung der Zahnücke aus der entgegengesetzten Richtung der Trennebene und zum anderen um 60° gegenüber der Prismenverzahnung von Bauteilschicht 1 verschoben. Die Separierung der zweiten Bauteilschicht geschieht analog zum ersten Schritt, jedoch in Subtraktionsrichtung 2. Im Anschluss daran wird die Bauteilschicht unter dem Dateinamen „Prototyp_Schicht_2.CAD-Datei“ abgespeichert.

Detaillierte Ausführungen zum „Einfügen, Trennen und Speichern“ sowie Einblicke in die programmiertechnische Umsetzung erfolgen zum Ende des Kapitels 5.3.3.

5.3.2 Allgemeiner Aufbau

Durch die Integration des Programm-Moduls in das CAD-System steigt der Grad der Komplexität stark an. Dies ist damit zu begründen, dass für die geforderte Benutzerfreundlichkeit sowie für die Zusatzfunktionalität „Einfügen, Trennen und Speichern“ eine Kommunikation zwischen dem Programm-Modul und dem CAD-System erforderlich ist, bei dem tiefe programmiertechnische Eingriffe auf Seiten des CAD-Systems notwendig sind.

Darüber hinaus muss für eine effiziente Wartbarkeit die Struktur des Programm-Moduls klar gegliedert und nachvollziehbar sein. Auf diese Weise kann das Aufsuchen und Beheben von Fehlern sowie das Verbessern und Anpassen von Funktionalitäten zeitnah durchgeführt werden.

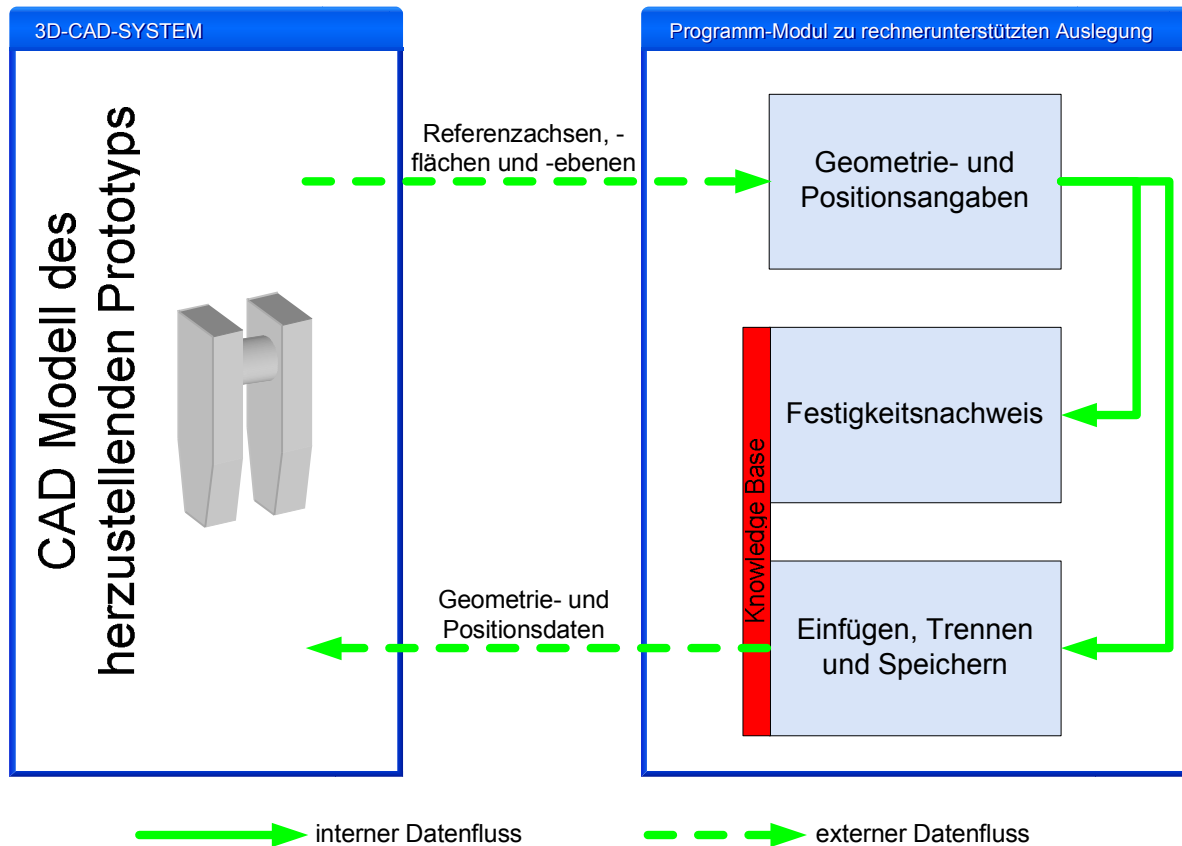


Abbildung 5-47: Allgemeiner Aufbau des Programm-Moduls zur rechnerunterstützten Auslegung

Die **Abbildung 5-47** zeigt den allgemeinen Aufbau des Programm-Moduls, sowie den internen und externen Datenfluss. Das Programm-Modul gliedert sich in die folgenden drei Module:

- Geometrie- und Positionsangaben
- Festigkeitsnachweis
- Einfügen, Trennen und Speichern

Die Gruppierung der Funktionalitäten in einzelne Module entspricht den in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Prozessschritten.

Das Modul „Geometrie- und Positionsangaben“ dient zur Eingabe der für die Ausführung des Programm-Moduls erforderlichen Daten. Zum einen werden die Angaben zur Geometrie der Prismenverzahnung und zum anderen die Angaben seiner Position im CAD-Modell vorgenommen. Dabei dienen die Geometrie- und Positionsangaben als Eingabedaten sowohl für das Unterprogramm „Festigkeitsnachweis“ als auch für das Unterprogramm „Einfügen, Trennen

und Speichern“. Während die Angaben zur Geometrie direkt über eine Eingabemaske vom Benutzer eingegeben werden können, erfolgen die Angaben zur Position, welche sich direkt auf das CAD-Modell beziehen, wie z.B. das Festlegen von Referenzachsen und –ebenen, interaktiv am CAD-Modell selbst. Dazu ist eine Schnittstelle zwischen dem Programm-Modul und dem CAD-System notwendig, welche die Selektionen am CAD-Modell erkennt und an das Programm-Modul weitergibt.

Das Modul „Festigkeitsnachweis“ beinhaltet die Berechnungsgrundlagen für die Prismenverzahnung und stellt somit einen Teil der „Knowledge Base“ dar. Die für den Festigkeitsnachweis erforderlichen Geometriedaten werden durch eine interne Abfrage an das Modul „Geometrie- und Positionsangaben“ ermittelt. Angaben, wie beispielsweise der Flächentraganteil und die zulässige Flächenpressung p_{zul} des Prismenwerkstoffs, werden durch den Benutzer direkt durch eine Eingabemaske an das Modul übermittelt.

Das Modul „Einfügen, Trennen und Speichern“ beinhaltet den Algorithmus zum Einfügen, Trennen und Speichern und stellt damit den zweiten Teil der „Knowledge Base“ dar. Für die Funktionen „Einfügen“ und „Trennen“ werden die hinterlegten Angaben aus dem Modul „Geometrie- und Positionsangaben“ durch einen internen Datenzugriff herangezogen. Über die CAD-Schnittstelle werden unter Berücksichtigung der vom Benutzer festgelegten Geometrie- und Positionsangaben die Prismenverzahnungen in das CAD-Modell eingefügt und dieses entsprechend in einzelne Bauteilschichten getrennt und abgespeichert. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich dabei um ein Anwendungsmodul, welches das CAD-System steuert bzw. automatisiert. Damit stellt dieses Software-Modul aus Sicht der programmtechnischen Umsetzung den komplexesten Teil des Programm-Systems dar.

5.3.3 Umsetzung und Integration in ein CAD-System

Die Realisierung des Programm-Moduls zur rechnerunterstützten Auslegung der Prismenverzahnung wird beispielhaft mit Hilfe des CAD-System *SolidWorks* der Firma *Dassault Systemes* demonstriert. *SolidWorks* ist ein weit verbreitetes 3D-CAD-Konstruktionssystem für den Maschinenbau, welches speziell für das Betriebssystem *Windows* entwickelt wurde (vgl. **Abbildung 5-48**).

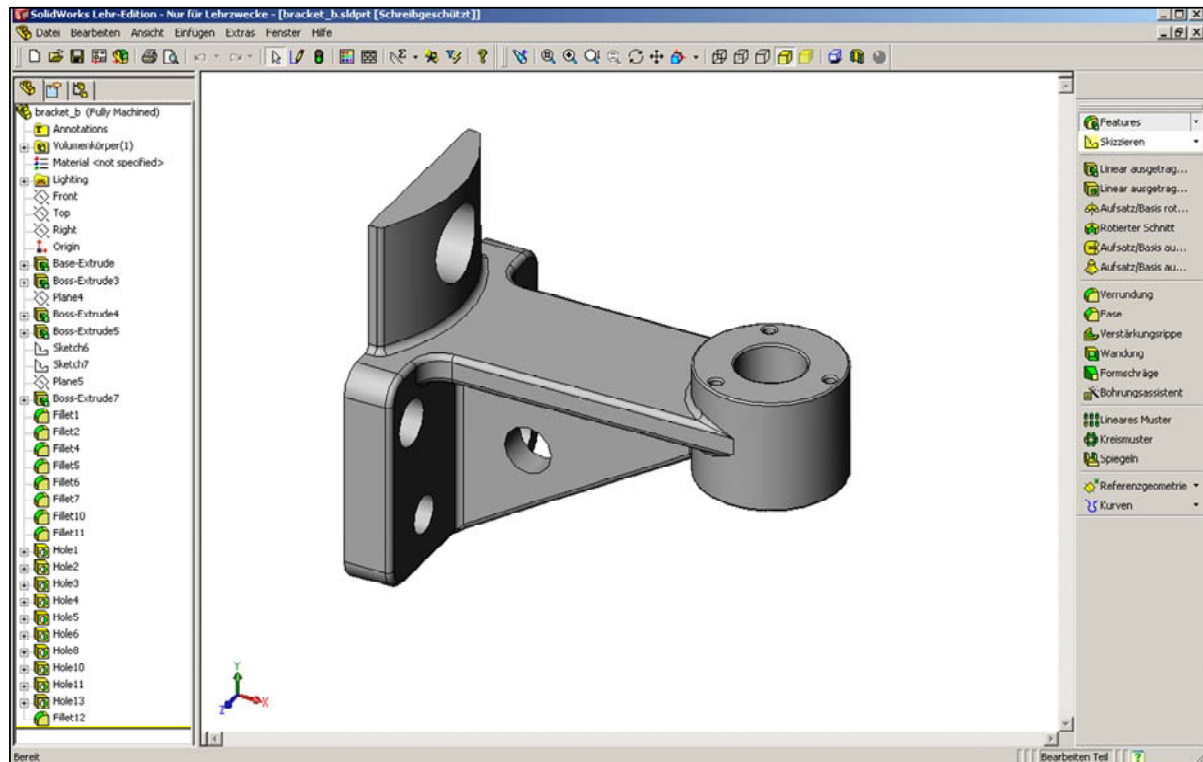


Abbildung 5-48: Benutzeroberfläche von SolidWorks

Die klar gegliederte Benutzeroberfläche, bestehend aus Menüs und Symbolleisten, entspricht dem von Microsoft gesetzten Standard und ermöglicht eine Einarbeitung innerhalb kürzester Zeit. *SolidWorks* ist ein parametrisches CAD-System, welches die Feature-Technologie unterstützt und auf Grund eines guten Preis-Leistungsverhältnis eine hohe Marktpresenz im mittelständischen Maschinenbau erreicht hat. Der Begriff „Parametrik“ bedeutet, dass ein CAD-Modell durch Bemaßungen, Gleichungen und geometrische Beziehungen definiert wird. Sollen beispielsweise die Abmessungen eines Modells verändert werden, so sind lediglich die steuernden Bemaßungen entsprechend anzupassen. Im Anschluss daran erfolgt automatisch eine Aktualisierung der abhängigen Werte und ein Neuaufbau des Modells. Durch die Unterstützung der Feature-Technologie können auch nicht-geometrische Informationen, wie beispielsweise Fertigungsdaten, Toleranzwerte und Werkstoffdaten, mit der Geometrie verknüpft werden.

Mit *SolidWorks* können Teile, Baugruppen und Zeichnungen erstellt werden. Diese sind assoziativ zueinander, sodass eine Änderung an einem Teil eine Aktualisierung der dazugehörigen Baugruppe sowie Zeichnung bewirkt. Auch der umgekehrte Fall, wie z.B. das Ändern einer Zeichnung, führt zu einer Aktualisierung des dazugehörigen Teils sowie der dazugehörigen Baugruppe.

SolidWorks bietet die Möglichkeit, den Funktionsumfang durch Zusatzanwendungen zu erweitern. Eine solche Zusatzanwendung ist das bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebene CAM-Modul „*CamWorks*“ zur Generierung von Steuerinformationen für CNC-Bearbeitungsmaschinen, welches in die Oberfläche von *SolidWorks* integriert ist. Weitere verfügbare Zusatzanwendungen sind z.B. *CosmosWorks* für die Durchführung von FE-Analysen, *PhotoWorks* für die Erstellung von fotorealistischen Bildern, sowie die *SolidWorks* Toolbox, welche eine Bibliothek an Normteilen für Baugruppen enthält.

Es besteht auch die Möglichkeit, einfache oder auch komplexe Zusatzanwendungen für *SolidWorks* selbst zu erstellen und in die Benutzeroberfläche zu integrieren. So können z.B. Operationen, welche direkt mit der *SolidWorks*-Benutzeroberfläche durchgeführt werden, über *SolidWorks*-Makros aufgezeichnet und zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführt werden. Damit können immer wiederkehrende Operationen automatisiert werden, wodurch der manuelle Aufwand für den Benutzer reduziert wird. Da ein aufgezeichnetes *SolidWorks*-Makro nur eine Abfolge von einzelnen Operationen beinhaltet, ist die Erstellung von komplexeren Zusatzanwendungen damit nicht möglich [21].

Für die Erstellung komplexer Zusatzanwendungen verfügt *SolidWorks* über ein **A**pplication **P**rogramming **I**nterface (API). Dabei handelt es sich um eine COM⁷-Programmiersprache, die von **V**isual **B**asic (VB), **V**isual **B**asic for **A**pplications (VBA), VB.NET, C++, C# und *SolidWorks* Makrodateien aus aufgerufen werden kann. Die Nutzung der COM-API ermöglicht einen direkten Zugriff auf die CAD-Datenstruktur des Systems [21][22].

Die Auswahl der Programmiersprache richtet sich in der Regel nach den Anforderungen des zu entwickelnden Programms. Da das zu entwickelnde Programm-Modul als Zusatzanwendung in die Oberfläche von *SolidWorks* zu integrieren ist, reduzieren sich die in Frage kommenden Programmiersprachen auf solche, welche COM unterstützen.

Von *SolidWorks* werden hierbei die Programmiersprachen Visual Basic und C++ besonders unterstützt, so dass für die Realisierung des Konzeptes eine Auswahl aus diesen beiden Sprachen getroffen werden kann. Ohne an dieser Stelle eine detaillierte Diskussion um die Vor- und Nachteile dieser beiden Programmiersprachen zu führen, können die wesentlichen Eigenschaften in Bezug auf das hier zu entwickelnde Konzept wie folgt zusammengefasst werden:

⁷ COM: Component Object Model

Zunächst kann eine Zusatzanwendung für die Implementierung der Funktionen des Konzepts grundsätzlich mit beiden Sprachen erstellt werden. In Bezug auf die Laufzeiteigenschaften bietet C++ die deutlich bessere Performance gegenüber Visual Basic. Dieser Unterschied macht sich besonders bemerkbar, wenn von der Zusatzapplikation in großem Umfang Operationen auf Elementen der Datenstruktur durchgeführt werden. Typische Aufgabenstellungen dieser Art sind beispielsweise Algorithmen, in denen mehrfach durch die gesamte Datenstruktur des CAD-Modells iteriert werden muss. Demgegenüber wird die Zeit für die Erstellung einer Zusatzapplikation mit Hilfe von C++ auf Grund der komplexeren Syntax länger ausfallen als bei Visual Basic, was noch dadurch verstärkt wird, dass durch die Verwendung von aufgezeichneten *SolidWorks*-Makros bereits Code-Vorlagen in Visual Basic erzeugt werden können, die direkt in ein VB-Projekt integriert werden können [23].

Da für die Umsetzung der hier zu entwickelnden Funktionen keine umfangreichen Operationen in der Datenstruktur erforderlich sind, kommt dem Gesichtspunkt der Performance eine untergeordnete Bedeutung zu, so dass als Programmiersprache für das Konzept Visual Basic ausgewählt wird.

Visual Basic ist die Weiterentwicklung der prozeduralen Programmiersprache Basic. Durch die nur unzureichenden Strukturierungsmöglichkeiten von Basic werden größere Programme unübersichtlich und schwer nachvollziehbar. Visual Basic behebt diesen Nachteil, indem es objektorientierte Erweiterungen anbietet, welche eine Modularisierung ermöglichen. Der Begriff „Visual“ in der Namensgebung bezieht sich auf das Verfahren zum Erstellen von grafischen Benutzeroberflächen, welches speziell für die Programmierung von Windows-Anwendungen entwickelt wurde.

Für die Umsetzung des Konzeptes spielt die Architektur des Programm-Moduls eine entscheidende Rolle. Gerade im Hinblick auf die angestrebte Integration in die Benutzeroberfläche von *SolidWorks* sind der Aufbau des Programm-Moduls sowie die Kommunikation mit *SolidWorks* von Bedeutung. Wie bereits erwähnt, verfügt *SolidWorks* über eine COM-API, welche einen direkten Zugriff auf dessen Funktionsumfang ermöglicht. Dabei beschreibt das von Microsoft veröffentlichte COM, wie Softwarekomponenten miteinander in Verbindung treten. Unter einer Softwarekomponente wird ein binärer, wieder verwendbarer Softwareteil verstanden.

COM basiert auf dem Client/Server-Prinzip. Unter einem COM-Server wird ein Objekt verstanden, welches in einer COM-fähigen Programmiersprache erstellt wurde. Der COM-Server bietet Funktionen an, welche über ein COM-Interface von einem COM-Client abgerufen und genutzt werden können. Eines der wesentlichen Eigenschaften von COM ist die Sprachunabhängigkeit. Damit ist es möglich, Funktionsaufrufe des Clients an den Server zu richten, die in einer völlig anderen Programmiersprache implementiert wurden. Dazu werden die Datentypen und Funktionsaufrufe, welche in jeder Programmiersprache unterschiedlich sind, in eine programmiersprachenunabhängige IDL (Interface Definition Language) umgewandelt. Im Rahmen der Programmentwicklung im Windows-Umfeld stellt Microsoft dazu den Microsoft IDL-Compiler⁸ zur Verfügung [24].

Im Zuge der Umsetzung des Programm-Moduls wird im Folgenden *SolidWorks* als COM-Server innerhalb eines Visual Basic Programms beispielhaft implementiert.

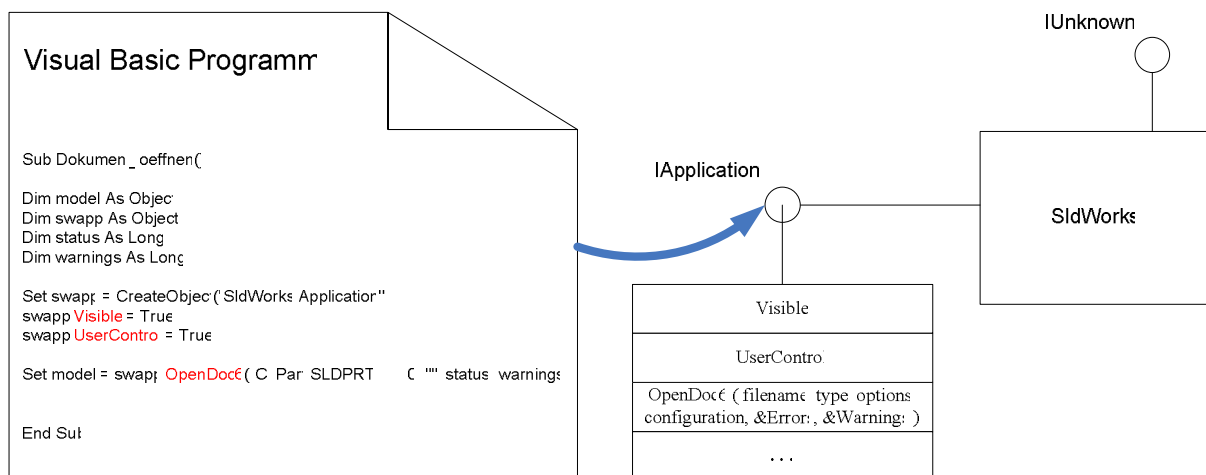


Abbildung 5-49: Implementierung eines COM-Servers innerhalb eines Visual Basic Programms

Dazu wird innerhalb der Funktion „**Dokument_oeffnen**“ das Objekt „**swapp**“ erzeugt, welches den COM-Server repräsentiert. Dieses Objekt verfügt über eine Schnittstelle „**IApplication**“, über welche Eigenschaften und Methoden angeboten werden. Das Visual Basic Programm zeigt zwei Eigenschaften „**Visible**“ und „**UserControl**“, deren Wert auf `True` oder `False` gesetzt werden können, sowie die Methode „**OpenDoc**“, mit der das Einzelteil „**Part**“ in *SolidWorks* geöffnet wird (vgl. **Abbildung 5-49**).

⁸ Compiler: Übersetzer

Die Sprachunabhängigkeit vom COM gestattet die Erzeugung des Objekts „**swapp**“ sowie den Zugriff auf dessen Eigenschaften und Methoden in der Visual-Basic-typischen Notation. So wird beispielsweise für die Objekterzeugung der Visual-Basic-Befehl „**CreateObject**“ verwendet. Die **Abbildung 5-50** zeigt eine Übersicht der Objekte von *SolidWorks*, welche über die COM-API angesprochen werden können. Dabei stellt das Objekt „**SldWorks**“ die oberste Ebene aller von *SolidWorks* angebotenen Objekte dar. Mit ihm sind allgemeine Funktionen durchführbar, wie z.B. das Erstellen, Öffnen, Schließen und Quittieren von Dokumenten, das Arrangieren von Fenstern in Bezug auf Größe und Position sowie die Auswahl des aktiven Dokuments. Der Zugriff auf andere Objekte von *SolidWorks* geschieht grundsätzlich über das Objekt „**SldWorks**“.

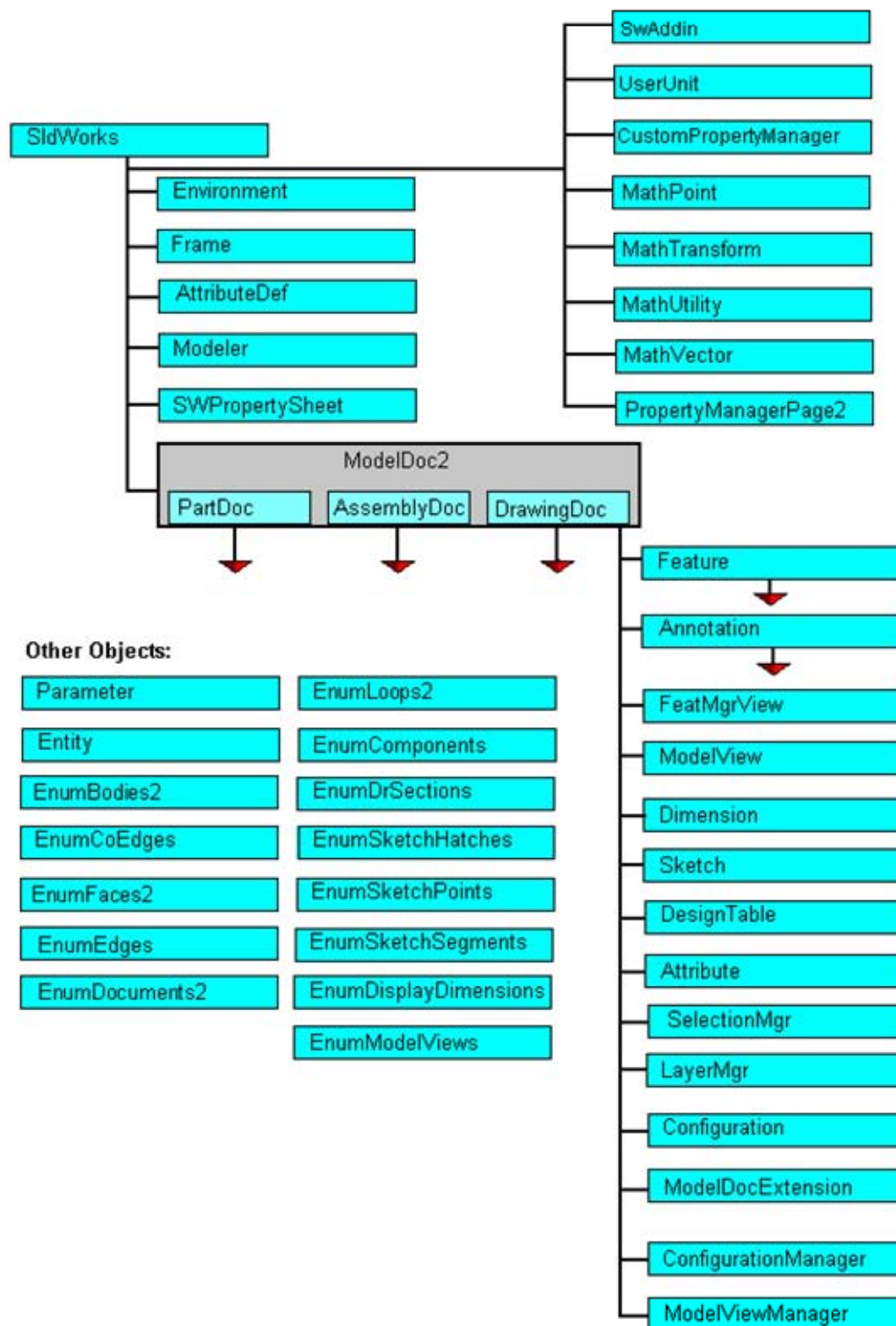


Abbildung 5-50: Objektdiagramm von SolidWorks

Soll beispielsweise der Flächeninhalt einer selektierten Fläche in der Einheit Quadratmeter ausgegeben werden, so sind die folgenden API-Funktionen gemäß der **Abbildung 5-51** zu verwenden.

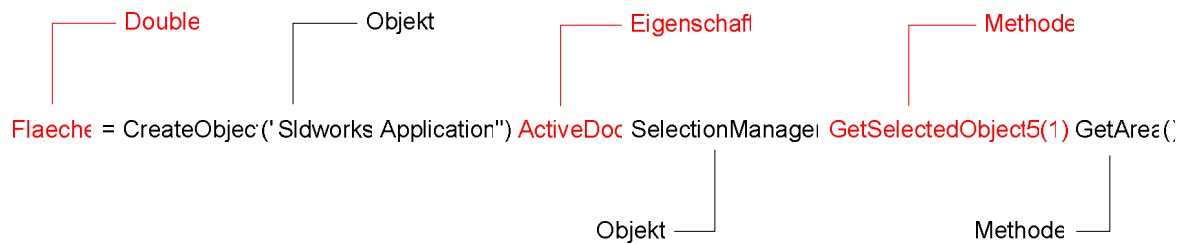


Abbildung 5-51: API-Funktionen zur Bestimmung des Flächeninhaltes einer Fläche

Die Methode „**GetArea()**“ liefert die gewünschte Fläche in Quadratmeter. Ihr Wert wird in eine Variable vom Typ „**Double**“ gespeichert. Für den Zugriff auf die Fläche ist jedoch ein Flächenobjekt notwendig. Wird z.B. die Fläche am Modell zuvor mittels der Maus selektiert, so kann die Selektion ausgelesen und ein Zeiger auf die Fläche gesetzt werden. Die Methode „**GetSelectedObject5(AtIndex)**“ liefert den gewünschten Zeiger auf die selektierte Fläche. Dazu wird die Methode über das dazugehörige Objekt „**SelectionManager**“ angesprochen. Der Parameter „**AtIndex**“ gibt dabei das Element der Selektionsliste an, welches ausgewählt und mit einem Zeiger versehen werden soll.

Zum Schluss muss eine Verbindung zu *SolidWorks* geschaffen und ein Zeiger auf das Dokument gesetzt werden, in welchem sich das zu untersuchende Modell befindet. Dazu wird in der Visual-Basic-typischen Notation ein Objekt erzeugt, welches den COM-Server von *SolidWorks* repräsentiert. Das Objekt „**CreateObject("SldWorks.Application")**“ verfügt über die Eigenschaft „**ActiveDoc**“, mit dem ein Zeiger auf das aktive Dokument gesetzt werden kann. Mit der gesetzten Eigenschaft lassen sich alle Methoden und Eigenschaften des **ModelDoc2**-Objektes ansprechen.

Für die Auswahl der richtigen API-Funktionen stellt *SolidWorks* eine umfassend dokumentierte API-Hilfe zur Verfügung. In Anlehnung an das Beispiel zur Bestimmung des Flächeninhaltes, zeigt die **Abbildung 5-52** Auszüge aus der API-Hilfe der verwendeten Funktionen.

Face2::GetArea	
Beschreibung:	Auslesen des Flächeninhaltes einer Fläche
Syntax:	retval = Face2.GetArea ()
Parameter:	-
Rückgabe:	(double) retval Fläche in Quadratmeter
SelectionMgr::GetSelectedObject5	
Beschreibung:	Zeiger auf selektiertes Objekt
Syntax::	retval = SelectionMgr.GetSelectedObject5 (AtIndex)
Parameter	(long) AtIndex Indexposition der Selektionsliste
Rückgabe:	(LPDISPATCH) retval Zeiger auf selektiertes Objekt
ModelDoc2::SelectionManager	
Beschreibung:	Erlaubt den Zugriff auf ein selektiertes Objekt eines Dokuments
Syntax::	SelectionMgr = ModelDoc2.SelectionManager
Parameter:	-
Rückgabe:	(LPDISPATCH) SelectionMgr Objekt für den SelectionMgr
SldWorks::ActiveDoc	
Beschreibung:	Zugriff auf das zur Zeit aktive Dokument
Syntax:	ActiveDoc = SldWorks.ActiveDoc
Parameter:	-
Rückgabe:	(LPDISPATCH) ActiveDoc Objekt für das Dokument

Abbildung 5-52: Funktionsbeschreibung der verwendeten API-Funktionen von SolidWorks

Soll das Programm-Modul bei jedem Start von *SolidWorks* automatisch geladen werden, so ist die Erstellung der Zusatzanwendung (COM-Addin) in Form einer Windows-DLL⁹ notwendig. Für

⁹ DLL: Dynamic Link Library

die Erstellung des COM-Addins wird als Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio 6.0 verwendet. *SolidWorks* bietet ein Quellcodegerüst an, welches sich bereits zu einer lauffähigen DLL übersetzen lässt (vgl. **Abbildung 5-53**).

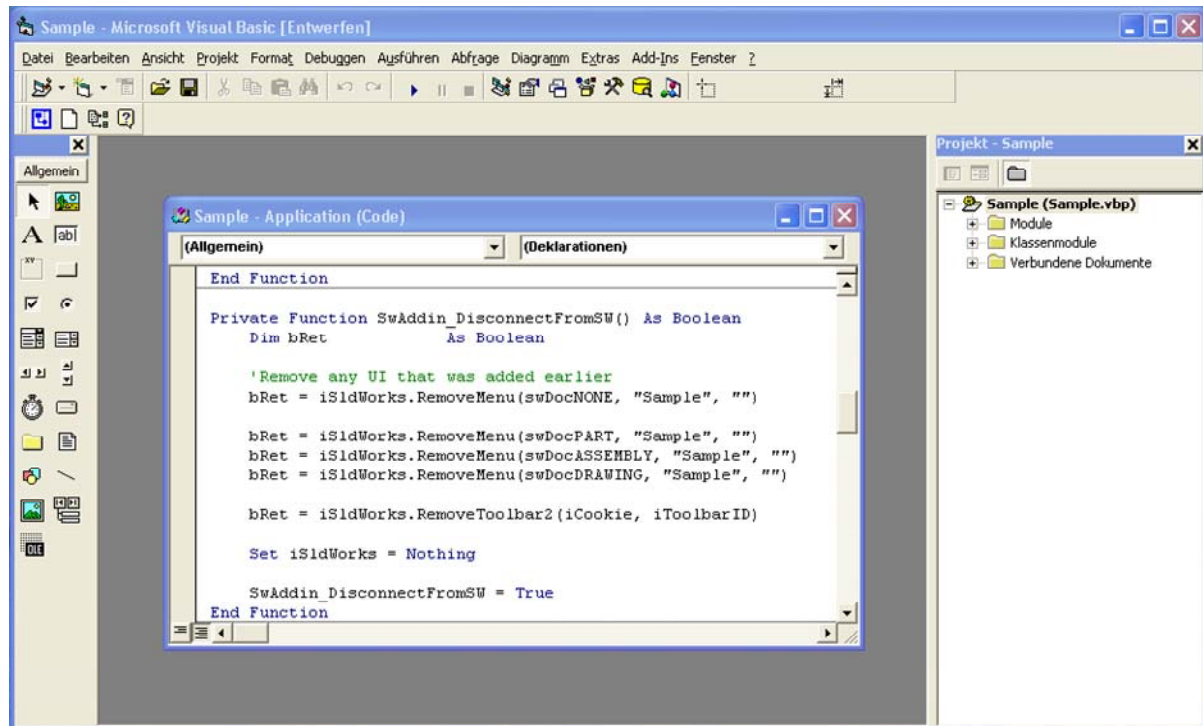


Abbildung 5-53: Quellcodegerüst in der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio 6.0

Dieses entspricht in der verwendeten Entwicklungsumgebung einem ActiveX-DLL-Projekt und besteht aus einem

- **Modul**,
- einem **Klassenmodul** und
- einem **verbundenem Dokument**.

Bei dem Modul handelt es sich um die Konstantendefinitionen von *SolidWorks*. Ab der Version *SolidWorks* 2004 besteht jedoch die Möglichkeit, das Modul durch eine Typelibrary zu ersetzen, welche über die Verweise der Entwicklungsumgebung einzubinden ist.

Zum Umfang der *SolidWorks*-API gehören auch Projektvorlagen für die Erstellung eigener Zusatzapplikationen. Mit diesen so genannten Application Wizzards lassen sich für die Programmiersprachen Visual Basic und C++ bereits Programmgerüste erstellen, die über die

fundamentalen Funktionen für die Anbindung an *SolidWorks* verfügen. So enthalten die mit dem Application Wizard erstellten Programme bereits eine vordefinierte Menüleiste und eine Toolbar, über welche die Funktionen des Anwendungsmoduls in die Benutzeroberfläche des CAD-Systems eingebunden werden. Unter anderem enthält das vordefinierte Anwendungsgerüst die beiden Funktionen:

SwAddin_ConnectToSW,

über welche das Menu und die Toolbar erzeugt und in *SolidWorks* integriert werden und die Schnittstellenfunktion

SwAddin_DisconnectFromSW,

über welche diese wieder entfernt werden können. Für die Nutzung der Schnittstellenfunktionen ist zuvor die Klasse

SWPublished.SwAddin

zu implementieren.

Bei dem verbundenem Dokument handelt es sich um eine so genannte Ressourcen-Datei, welche die Grafik im Bitmap-Format für das Icon der Toolbar beinhaltet. Diese kann mit Hilfe eines Editors in der Entwicklungsumgebung verändert und dem eigenen Layout abgepasst werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Ressourcen-Datei um weitere Bitmap-Grafiken zu erweitern.

Aufbauend auf dem vorgestellten Quellcodegerüst kann dieses nun um den eigentlichen Programmtext zur Umsetzung des Programm-Moduls für die rechnerunterstützte Auslegung der Prismenverzahnung erweitert werden. Dabei ist dieses im Wesentlichen um zwei weitere Module zu ergänzen. Zum einen wird ein Modul für den Festigkeitsnachweis und ein weiteres Modul für das Einfügen, Trennen und Speichern eingebunden. Hinzu kommt die Implementierung von so genannten Formularen, welche die grafische Benutzeroberfläche des Programm-Moduls enthalten. So wird beispielsweise das Unterprogramm „Geometrie- und Positionsangaben“ als Formular implementiert.

Da das Modul zum Einfügen, Trennen und Speichern das umfangreichste Modul darstellt, werden im Folgenden Ausschnitte aus dem Quelltext mit den wichtigsten API-Funktionen zu dessen Umsetzung beschrieben. Die Ausführungen beziehen sich auf den in Kapitel 5.3.1 bereits vorgestellten zylindrischen Körper mit einer Trennebene.

Die erforderlichen Daten zum Einfügen, Trennen und Speichern werden aus dem Modul „Positions- und Geometrieangaben“ herangezogen. Die vom Benutzer angegebenen Daten sind dort in einem so genannten **MSFlexGrid** gespeichert. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales Tabellen-Steuerelement, ähnlich wie das einer Excel-Tabelle. Es können dort gezielt Daten abgelegt und wieder angesprochen werden. Neben den angegebenen Daten des Benutzers wird das **MSFlexGrid** vom Programm-Modul selbst zum Speichern von Daten genutzt, welche während der Laufzeit entstehen. In den nachfolgenden Quelltextausschnitten ist daher oft ein Zugriff auf das Tabellen-Steuerelement zu erkennen.

Im ersten Schritt erfolgt das Einfügen der Prismenverzahnung. Dazu ist es erforderlich, dass das CAD-Modell gemäß den Angaben des Benutzers um eine Trennebene und eine Verzahnungs-Bezugsebene ergänzt wird (vgl. Abbildung 5-38). Zudem sind zwei weitere Ebenen notwendig, welche im weiteren Verlauf für die eigentliche Erstellung der Verzahnung verwendet werden. Diese Ebenen sind parallel zur Trennebene angeordnet und stellen die Zahnkopf- bzw. Zahnfußebene der Prismenverzahnung dar. Der Abstand beider Ebenen zueinander entspricht der Zahnhöhe.

Das Erstellen einer Ebene wird beispielhaft an einer Trennebene vorgeführt, da diese für das Programm-Modul eine Bezugsebene darstellt. Alle anderen Ebenen, wie z.B. Zahnkopf- und Zahnfußebene, werden auf die gleiche Weise erzeugt.

Mit Hilfe der Methode **CreatePlaneAtOffset3** wird eine Offset-Ebene gemäß der vom Benutzer festgelegten Referenzfläche oder -ebene im Abstand der angegebenen Schnitttiefe in das Modell eingefügt. Die **Abbildung 5-54** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt, in dem die dafür notwendige API-Funktion rot gekennzeichnet ist. Zudem ist der Zugriff das **MSFlexGrid** „**MSFTabelle**“ dargestellt, welches für die Erzeugung der Offset-Ebene die notwendigen Daten, wie die Referenzfläche und die dazugehörigen Schnitttiefe, bereithält (blau gekennzeichnet). Weiterhin ist im Quelltextausschnitt deutlich zu erkennen, dass die Variable „**schnitttiefe**“ als Parameter an die Methode **CreatePlaneAtOffset3** übergeben wird.

```

*****
' Erstellen der Trennebene
*****

schnitttiefe = CDBl(Steuermenue MSFTabelle TextMatrix(3 Akl_col)) / 1000
auswah = Steuermenue MSFTabelle TextMatrix(1 Akl_col)
Set entx = Part GetEntityByName(auswah 2)

If entx Is Nothing Then
    MsgBox " Es konnte keine Richtungsvorgabe " & vbCr & _
        " für den Schnitt " & Akl_col & vbCr & " bestimmt werden "
    Steuermenue Schnittebene_box SetFocus
    Beim_Zeichnen = False
    Exit Sub
Else
    boolstatus = entx Select2(True 0)
    Set swFeat = Part CreatePlaneAtOffset3(schnitttiefe True True)
    Set Face2 = Part FeatureByPositionReverse(0)
    Face2 name = 'Ref_Richtung_Trennfläche' & " Schnitt-Nr. " & Akl_col
    boolstatus = Face2 Select2(False 0)
    Part ClearSelection2 True
End If
*****

```

Abbildung 5-54: Quelltextausschnitt zum Erstellen der Trennebene

Im Anschluss daran wird die eigentliche Prismenverzahnung erstellt. Dazu werden, wie bereits in Kapitel 5.3.1 erläutert, die Zahnücken erzeugt. Als erstes wird ein halbes Zahnückenenvolumen als ausgetragener Schnitt erstellt. Dazu werden zwei Skizzen sowie eine Leitlinie vom Programm-Modul generiert. Bei den Skizzen handelt es sich um die Querschnittgeometrie des Zahnkopfes und um die Querschnittgeometrie des Zahnfußes. Die Leitlinie dient als Austragungsrichtung für den Schnitt, bei dem ausgehend von der Querschnittgeometrie des Zahnkopfes entlang der Leitlinie auf die Querschnittgeometrie des Zahnfußes ausgetragen wird.

Dazu wird auf den bereits erzeugten Zahnkopf- und Zahnfußebenen jeweils eine Skizze mittels der Methode **InsertSketch2** und im Anschluss daran die Geometrie der Querschnitte erzeugt. Diese bestehen im Wesentlichen aus geraden Liniensegmenten und einem Kreisbogen, welche mittels der Methode **CreateLine2** und **CreateCircle2** erzeugt werden. Bei dem Kreisbogen handelt es sich um den Außendurchmesser der Prismenverzahnung. Für die Methode **CreateLine2** ist ein Anfangspunkt (x_1, y_1, z_1) und ein Endpunkt (x_2, y_2, z_2) anzugeben. Für die Erzeugung eines Kreises (**CreateCircle2**) sind die Koordinaten des Mittelpunktes sowie eines Punktes auf der Kreislinie für den Durchmesser erforderlich. Die Generierung der Leitlinie geschieht ebenfalls mittels der Methode **CreateLine2**. Da diese jedoch auf einer räumlichen

Ebene liegt, ist zuvor eine 3D-Skizze mittels der Methode **Insert3DSketch** zur erzeugen. Die Lage der 3D-Skizze mit der erstellten Leitlinie entspricht dabei der Austragungsrichtung. Damit später ein problemloser Zugriff auf die Skizzen sowie auf die Leitlinie möglich ist, werden diese mit einem Namen versehen. So erhält z.B. die Skizze des Zahnkopfes den Namen „**Geometrie des Zahnkopfes**“ und die Leitlinie den Namen „**Leitlinie**“.

Nach dem Erstellen der Skizzen sowie der Leitlinie wird der Schnitt ausgetragen. Dazu wird die Skizze des Zahnkopfes, des Zahnfußes sowie die Leitlinie selektiert (vgl. **Abbildung 5-55**).

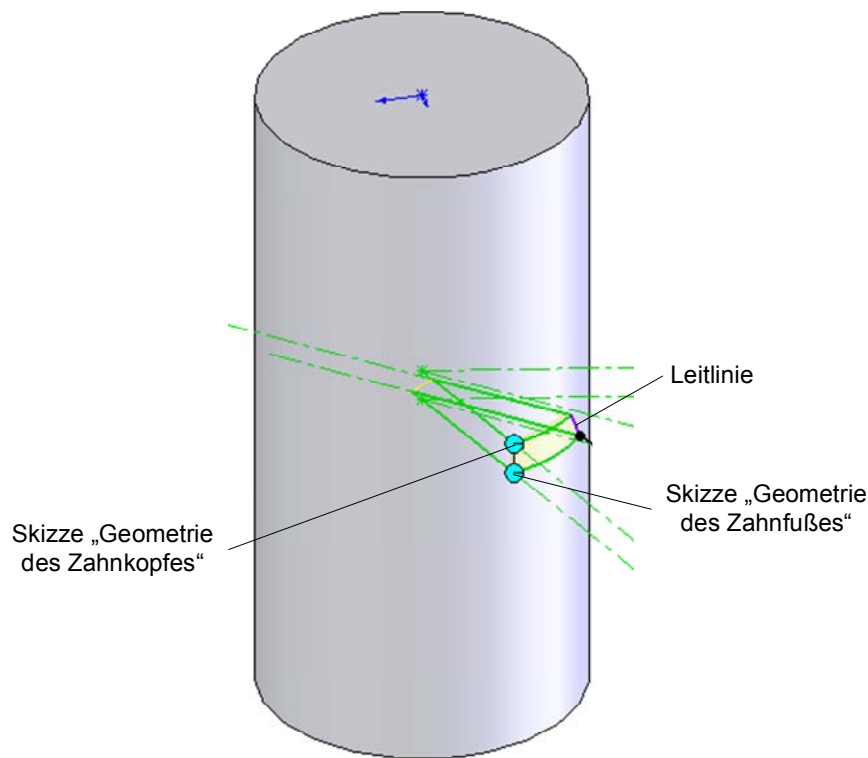


Abbildung 5-55: Austragen eines Schnittes zum Erstellen einer halben Zahnücke

Dieser Vorgang geschieht mittels der Methode **SelectByID**, bei der der Zugriff auf die Elemente über die zuvor vergebenen Namen erfolgt. Die selektierten Elemente werden dann mittels der Methode **InsertCutBlend** zu einem Schnitt austragen. Die **Abbildung 5-56** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt.

```
*****
' Erstellen der Zähne bzw. Zahn-luecken
*****

Set Face2 = Nothing
boolstatus = Part Extension SelectByID(' Geometrie des Zahnfusses' & _
    " Schnitt-Nr. " & Akt_col "SKETCH" 0 0 0 False 1 Nothing)
boolstatus = Part Extension SelectByID(' Geometrie des Zahnkopfs' & _
    " Schnitt-Nr. " & Akt_col "SKETCH" 0 0 0 True 1 Nothing)
boolstatus = Part Extension SelectByID(' Leitlinie' & " Schnitt-Nr. " & _
    Akt_col "SKETCH" 0 0 0 True 4098 Nothing)
Set Face2 = Part FeatureManager InsertCutBlenc(0 0 0 1 0 0 0 0 0, _
    0 1 1)
```

Abbildung 5-56: Quelltextausschnitt zum Erstellen der Zahn-lücke

Dem dabei entstehenden halben Zahn-lückenvolumen wird der Name „Zahn-lücke_half“ zugeordnet und an der Verzahnungs-Bezugsebene gespiegelt (vgl. **Abbildung 5-57**).

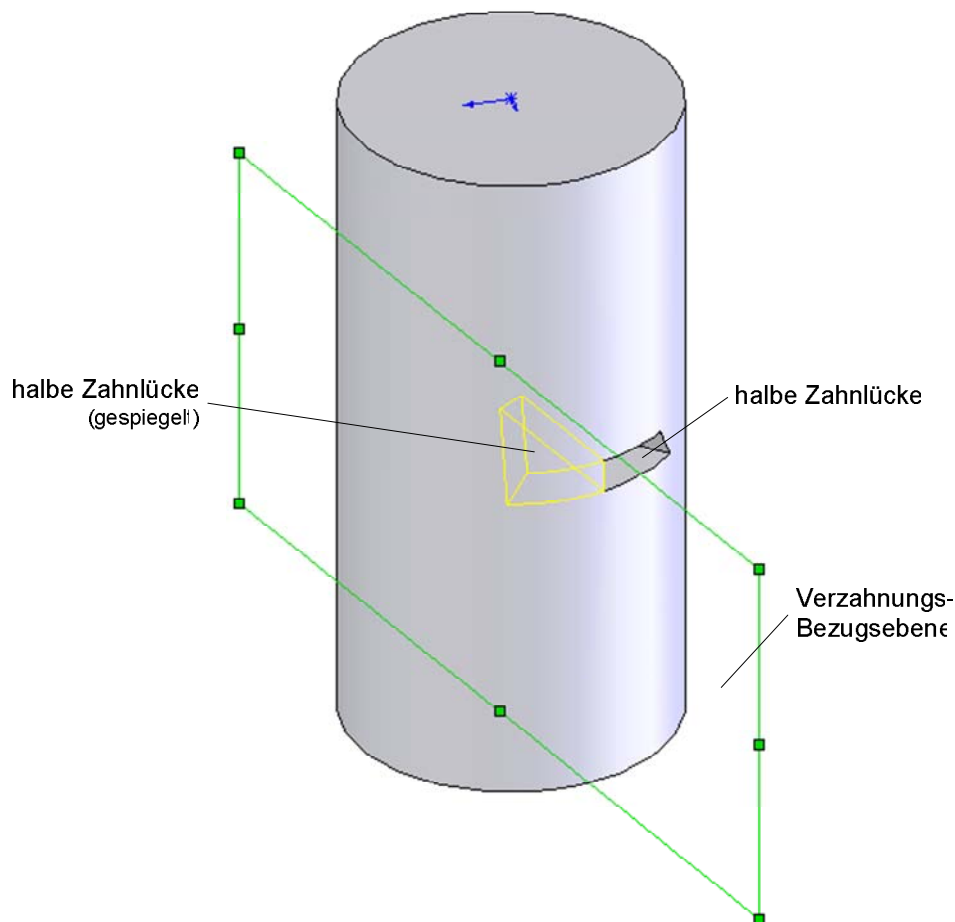


Abbildung 5-57: Spiegeln der halben Zahn-lücke an der Verzahnungs-Bezugsebene

Das Spiegeln geschieht mittels der Methode **InsertMirrorFeature**. Für die Ausführung der Methode werden zuvor das halbe Zahn-lückenvolumen sowie die Verzahnungs-Bezugsebene selektiert (**SelectByID**). Die **Abbildung 5-58** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt.

```
...  
*** Spiegeln ***  
boolstatus = Part Extension SelectByID("Zahn-lücke_half" & " Schnitt-Nr. " &  
    & Akt_col "BODYFEATURE" 0 0 0 False 1 Nothing)  
boolstatus = Part Extension SelectByID("Verzahnungs_Bezugsebene" &  
    " Schnitt-Nr. " & Akt_col "PLANE" 0 0 0 True 2 Nothing)  
Set Face2 = Part FeatureManager InsertMirrorFeature(False False False, _  
    False)  
namen_doppel_suchen ("Zahn-lücke_spiegeln" & " Schnitt-Nr. " & Akt_col)  
Face2 name = "Zahn-lücke_spiegeln" & " Schnitt-Nr. " & Akt_col  
Part ClearSelection2 True  
...
```

Abbildung 5-58: Quelltextausschnitt zum Spiegeln

Gemäß der Anzahl der Zähne wird anschließend ein zirkulares Mustern der Zahn-lücke um die festgelegte Referenzachse mit der Methode **FeatureCirPattern** ausgeführt (vgl. **Abbildung 5-59**).

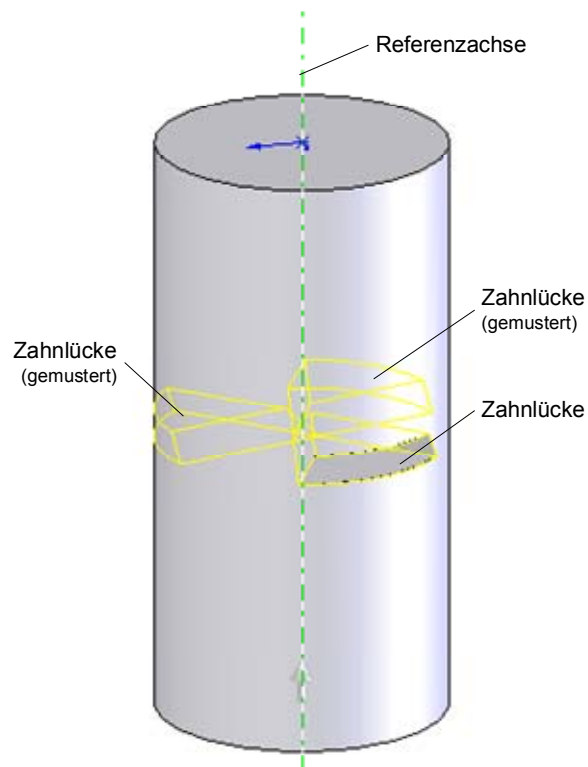


Abbildung 5-59: Muster der Zahn-lücke um die Referenzachse

Die **Abbildung 5-60** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt. Neben der bereits mehrfach verwendeten Methode zur Selektion von Elementen ist auch der Zugriff auf das MSFFelxGird „**MSFTabelle**“ dargestellt, in der die Referenzachse für die Selektion hinterlegt ist (blau gekennzeichnet).

```
*** Mustern ***
boolstatus = Part Extension SelectByID('Zahnlücke_spiegelr' & _
    " Schnitt-Nr. " & Akt_col "BODYFEATURE" 0 0 0 False 4, _
    Nothing)
boolstatus = Part Extension SelectByID(Steuermaenue MSFTabelle TextMatrix(2, _
    Akt_col) "AXIS" 0 0 0 True 1 Nothing)
boolstatus = Part Extension SelectByID('Zahnlücke_half' & " Schnitt-Nr. " _
    & Akt_col "BODYFEATURE" 0 0 0 True 4 Nothing)
Part FeatureCirPattern CInt(Steuermaenue MSFTabelle TextMatrix(4 Akt_col)), _
    2 * Pi / CInt(Steuermaenue MSFTabelle TextMatrix(4 Akt_col)), _
    False "NULL"
Set Face2 = Part FeatureByPositionReverse(0)
namen_doppel_suchen ("die anderen Zähne" & " Schnitt-Nr. " & Akt_col)
Face2 name = 'die anderen Zähne' & " Schnitt-Nr. " & Akt_col
```

Abbildung 5-60: Quelltextausschnitt zum Mustern

Im zweiten Schritt des Trennens erfolgt das Separieren der Bauteilschicht mit der Prismenverzahnung vom restlichen Modell des Prototyps. Dazu wird auf der bereits bekannten Zahnkopfebene eine weitere Skizze erstellt (**InsertSketch2**) und darin mittels der Methode **SketchRectangle** ein Rechteck generiert. Im Anschluss daran wird ein linear ausgetragener Schnitt des zuvor generierten Rechteckes ausgeführt, wodurch der nicht zur Bauteilschicht gehörende Teil des Prototyps entfernt wird (vgl. **Abbildung 5-61**).

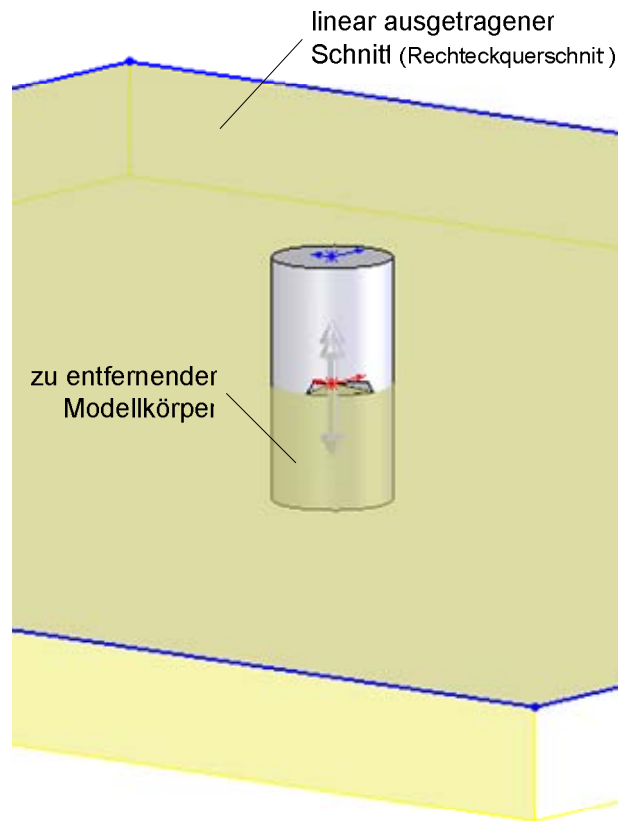


Abbildung 5-61: Entfernen des nicht zur Bauteilschicht gehörenden Modellkörpers

Die Umsetzung wird mittels der Methode **FeatureCut** realisiert. Der linear ausgetragene Schnitt muss sowohl im Querschnitt als auch in der Austragungslänge größer als der zu entfernende Bereich sein. Die **Abbildung 5-62** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt. Zudem ist ein Zugriff auf das MSFlexGrid „**MSFTabelle**“ zu erkennen, bei dem der Wert für die Spitzenrücknahme zur Sicherstellung der Flanken-zentrierung der Prismenverzahnung herangezogen wird. Dieser Wert wird bei der Austragung des linearen Schnittes berücksichtigt.

```
...  
*** Trennen ***  
boolstatus = Part.Extension.SelectByID("Zahnform_unten" & " Schnitt-Nr. " & _  
    Akt_col, "PLANE", 0, 0, 0, False, 0, Nothing)  
Part.InsertSketch2 True  
Part.SketchRectangle -0.5 + Ursprung_x, 0.5 + Ursprung_y, 0, 0.5 + _  
    Ursprung_x, -0.5 + Ursprung_y, 0, 1  
Part.InsertSketch2 True  
Set Face2 = Part.FeatureByPositionReverse(0)  
namen_doppel_suchen ("Abschneiden Zahn oben" & " Schnitt-Nr. " & Akt_col)  
Face2.name = "Abschneiden Zahn unten" & " Schnitt-Nr. " & Akt_col  
boolstatus = Part.Extension.SelectByID("Abschneiden Zahn oben" & _  
    " Schnitt-Nr. " & Akt_col, "SKETCH", 0, 0, 0, False, 0, Nothing)  
Spitzenabnahme = CDb1(Steuermenue.MSFTabelle.TextMatrix(11, Akt_col)) / 1000  
Part.FeatureManager.FeatureCut False, False, False, 1, 0, 0.28, _  
    Spitzenabnahme, False, False, False, False, 0, 0, False, False, _  
    False, False, 0, 1, 1  
...
```

Abbildung 5-62: Quelltextausschnitt zum Trennen

Im dritten und letzten Schritt wird die separierte Bauteilschicht gemäß der gezeigten Dateistruktur in der Abbildung 5-43 gespeichert. Hierfür wird die Methode **SaveAs4** verwendet, welche ein *SolidWorks*-Dokument unter einem neu vergebenen Namen abspeichert. Die **Abbildung 5-63** zeigt den dazugehörigen Quelltextausschnitt der Visual-Basic-Funktion „Datei_speichern“. Neben der API-Methode ist zudem die Implementierung des COM-Servers deutlich zu erkennen, welcher im Quelltext blau gekennzeichnet ist.

Im Anschluss an das Speichern der Bauteilschicht beginnt der Prozess erneut, bei dem die zweite Bauteilschicht mit der Prismenverzahnung erzeugt wird und vom Modell des Prototyps getrennt wird. Das Programm-Modul durchläuft hierbei eine Schleife, die in Abhängigkeit von der Anzahl an einzufügenden Prismenverzahnungen unterschiedlich oft ausgeführt wird.

```
Function Datei_speichern(postfix As String, Number As Integer) As Boolean

    On Error GoTo Datei_speichern_Err
    Static partname As String
    Dim swApp As Object
    Dim Part As Object
    Dim X As Integer
    Dim Y As Integer
    Dim file_saveas_name As String
    Dim strgefunden As Boolean
    Dim nErrors As Long
    Dim nWarnings As Long

    Set swApp = CreateObject("SldWorks.Application")
    Set Part = swApp.ActiveDoc

    If Len(partname) < 1 Then partname = Part.GetTitle
    X = InStr(1, partname, ".", vbBinaryCompare)
    If X > 0 Then
        partname = Left$(partname, X - 1)
    End If

    Y = InStr(1, partname, postfix, vbBinaryCompare)
    If Y > 1 Then
        partname = Left$(partname, Y - 2)
    End If

    strgefunden = True
    Do While strgefunden
        file_saveas_name = CStr(partname & "_" & postfix & "_" & Number & ".SLDPRT")
        strgefunden = (Dir(Left(Part.GetPathName, InStr(Part.GetPathName, partname) _
            - 1) & file_saveas_name) <> "")
        If strgefunden Then
            Number = Number + 1
        End If
    Loop

    Datei_speichern = Part.SaveAs4(file_saveas_name, swSaveAsCurrentVersion, _
        swSaveAsOptions_Silent, nErrors, nWarnings)
    Exit Function
Datei_speichern_Err:
    MsgBox Err.Description & vbCrLf & _
        "in Hirth_projekt.hilfsfunktionen.Datei_speichern " & "at line " & Erl
    Resume Next

End Function
```

Abbildung 5-63: Quelltext der Visual Basic Funktion „Datei_speichern“

6 Exemplarische Verifikation

Im Folgenden wird die Wirksamkeit des entwickelten Gesamtkonzeptes anhand drei konkreter Beispiele verdeutlicht. Die Verifikation umfasst dabei im Einzelnen

- das MLJ-Fügekonzzept, am Beispiel der Bohrung-Zapfen-Kombination sowie der Prismen-Verzahnung,
- das MLJ-Vorrichtungskonzept, mit den speziell für die Bohrung-Zapfen-Kombination und die Prismen-Verzahnungen entwickelten Vorrichtungen, und
- das Programm-Modul zur rechnerunterstützten Auslegung der Prismen-Verzahnung

In den ersten beiden Beispielen wird anhand eines komplexen Probekörpers sowohl die Bohrung-Zapfen-Kombination als auch die Prismen-Verzahnung zur Nutzung als Füge- und Spanntechnik verifiziert. Dadurch wird im besonderen Maße die Herstellung mit unterschiedlichen MLJ-Fügetechniken und den dazugehörigen Vorrichtungen deutlich. Zusätzlich kommt das entwickelte Programm-Modul zur rechnerunterstützten Auslegung und frästechnischen Aufbereitung des Prototyps am Beispiel der Prismen-Verzahnung zum Einsatz.

Am dritten und letzten Beispiel wird mittels der Geometrie einer Einzylinderkurbelwelle die Notwendigkeit einer prototypischen Herstellung mittels Drehen und Fräsen aufgezeigt. Die Wirksamkeit des Programm-Moduls wird hierbei durch die datentechnische Aufbereitung der Kurbelwelle nachvollziehbar dargestellt.

Zum Abschluss der Verifikation wird eine Genauigkeitsanalyse der Prismen-Verzahnung bezüglich der Zentriereigenschaft durchgeführt.

6.1 Beispiel 1: Komplexer Probekörper mit Bohrung-Zapfen-Kombination

Die **Abbildung 6-1** zeigt den komplexen Probekörper (Durchmesser = 110mm, Höhe 50mm), welcher bereits aus Kapitel 5.2.2.3 bekannt ist. Dieser soll im Folgenden mittels konventioneller 3-Achs-CNC-Frästechnologie hergestellt werden. Durch seine komplexe Flügelgeometrie ist eine frästechnische Bearbeitung in einem Herstellungsschritt nicht möglich. Für die Fertigung ist daher im Vorfeld eine Aufbereitung des CAD-Modells notwendig.

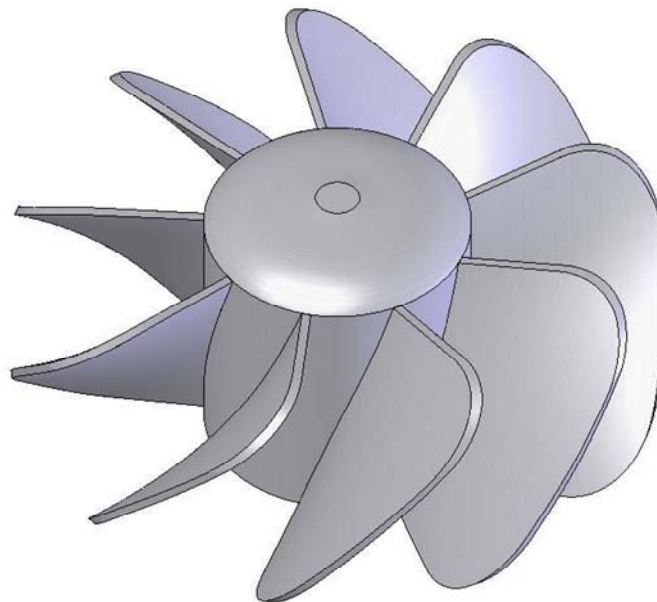


Abbildung 6-1: komplexer Probekörper

Wie sich später zeigen wird, erfordert dies eine Zerlegung in einzelne Schichten. Als MLJ-Fügetechnik wird die modifizierte Bohrung-Zapfen-Kombination angewandt. Da es sich bei dem Prototyp um einen Probekörper handelt, erfolgt das Fügen kontextunabhängig (vgl. Kapitel 5.2). Analog zu Kapitel 2.1 gliedert sich die Herstellung in eine

- datentechnische sowie
- fertigungstechnische Ausführung.

Da die rechnerunterstützte Auslegung exemplarisch für die Prismen-Verzahnung vorgenommen wird, liegt der Schwerpunkt bei diesem Beispiel auf der Verifizierung der fertigungstechnischen Ausführung.

6.1.1 Datentechnische Ausführung

Für die frästechnische Fertigung von Bauteilen ist es notwendig, dass der Fräser jeden Punkt auf der herzustellenden Kontur erreichen kann (vgl. Kapitel 2.2.1). Am Beispiel des komplexen Probekörpers ist dies nicht gegeben. Der Grund dafür liegt in einer Kollision zwischen Fräser und Probekörper bzw. der Flügelgeometrie. Die **Abbildung 6-2** verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand einer Kollisionsprüfung wie sie innerhalb einer CAD-Baugruppe mittels der Interferenzprüfung manuell oder auch automatisiert durchgeführt werden kann (vgl. Kapitel 2.2.1).

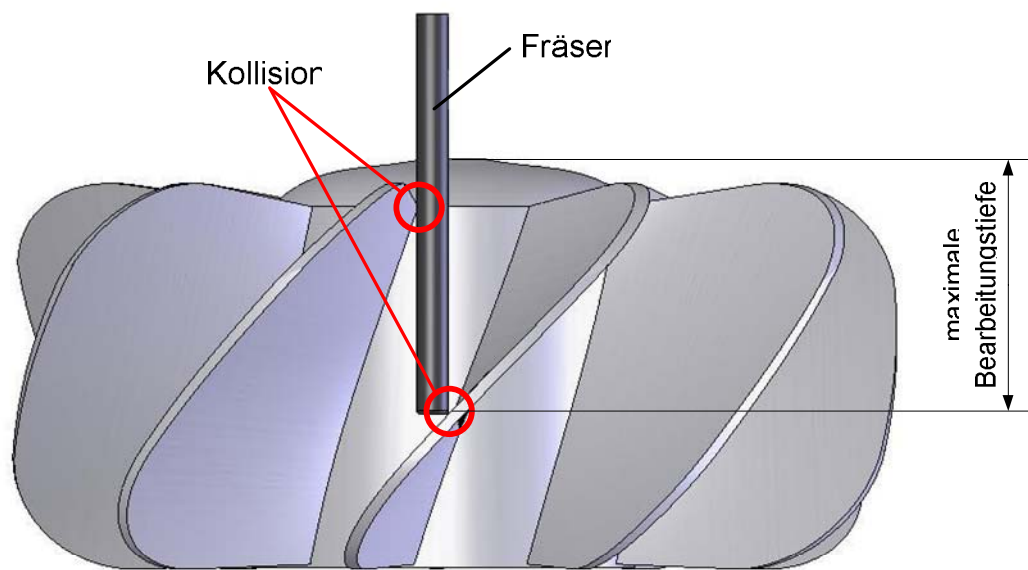


Abbildung 6-2: Kollisionsprüfung zwischen Fräser und komplexen Probekörper

Das Ergebnis der Kollisionsprüfung ist die maximale Bearbeitungstiefe, in der der Probekörper durchgeschnitten wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese von der Geometrie des gewählten Bearbeitungswerkzeugs, wie z.B. dem Durchmesser und der Bearbeitungslänge, abhängt (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Abbildung 6-2 gezeigte Fräser besitzt einen Durchmesser von 4mm und eine Bearbeitungslänge von 50mm. Bei einer Minimierung des Durchmessers würde die maximale Bearbeitungstiefe zwar zunehmen, eine Kollision wäre jedoch auch dann nicht vermeidbar. Weiterhin ist zu beachten, dass eine größere Bearbeitungstiefe meist eine große Bearbeitungslänge des Fräasers voraussetzt. Große Bearbeitungs- bzw. Ausspannlängen können zu Durchbiegungen am Fräser und somit zu Einbußen der Fertigungsgenauigkeit führen (vgl. Kapitel 2.3.2).

Die **Abbildung 6-3** zeigt den in zwei Schichten durchgeschnittenen komplexen Probekörper. Aus Gründen der Symmetrie wurde dieser oberhalb der maximalen Bearbeitungstiefe in zwei gleich hohe Schichten zerlegt.

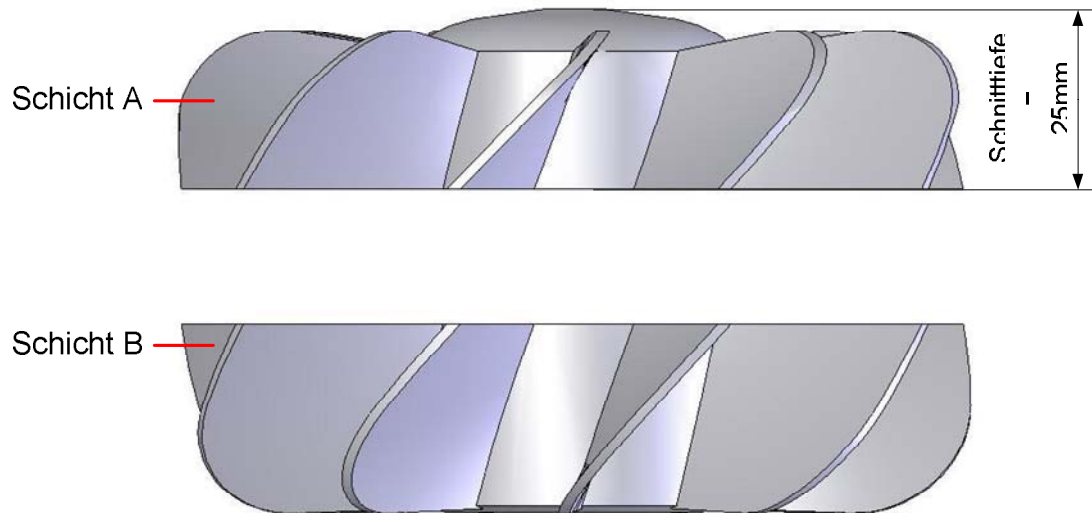


Abbildung 6-3: virtuelle Bauteilzerlegung

Durch die Bauteilzerlegung ist eine kollisionsfreie frästechnische Bearbeitung von **Schicht A** und **Schicht B** gegeben. Dazu ist jedoch, wie in Kapitel 2.2 vorgegeben, eine zweiseitige Bauteilbearbeitung erforderlich.

Im Anschluss an die Bauteilzerlegung wird die Erzeugung der inneren Hilfsgeometrie vorgenommen. Das datentechnische Hinzufügen der Bohrung-Zapfen-Kombination zu den Schichten kann manuell oder automatisch erfolgen (vgl. Kapitel 2.2.1). Für die spätere Nutzung als Füge- und Spanntechnik ist die Dimensionierung der Bohrung-Zapfen-Kombination entscheidend. Diese umfasst

- die Wahl des Zapfendurchmessers sowie
- die Wahl des Spiels zwischen Bohrungen und Zapfen.

Der Durchmesser der Zapfen richtet sich nach den auftretenden mechanischen Belastungen. Da es sich im vorliegenden Fall um einen Probekörper handelt, wird der Zapfendurchmesser anhand der Zerspankräfte dimensioniert, welche bei der Nutzung als Spanntechnik während der Fräsbearbeitung entstehen. Das komplexe Themengebiet zur Ermittlung von Zerspankräften wird in Kapitel 6.2 in Zusammenhang mit dem Programm-Modul zur rechnerunterstützten Auslegung der Prismen-Verzahnung eingehend erläutert. Im vorliegenden Fall wird für die

Herstellung des Probekörpers der Werkstoff *AlMgSi 1* und ein Zapfendurchmesser von 8mm gewählt. Dieser ist in Bezug auf die auftretenden Zerspankräfte (vgl. Kapitel 6.2) stark überdimensioniert, jedoch passt dieser zu den Proportionen der Schichten.

Aufgrund der mechanischen Überbestimmung der Bohrung-Zapfen-Kombination ist die Wahl des Spiels zwischen Bohrungen und Zapfen für den späteren Fügevorgang wichtig. Da auf das Spannen von Bohrungen verzichtet werden soll (vgl. Kapitel 5.2.1), erhält die **Schicht A** zusätzlich zu den Bohrungen zwei Zapfen und die **Schicht B** zusätzlich zu den Zapfen zwei Bohrungen. Dadurch verfügt jede Schicht über Bohrungen und Zapfen, wodurch sich die mechanische Überbestimmung grundsätzlich verschärft (vgl. **Abbildung 6-4**). In Anbetracht der massiven Zapfen sind jedoch keine relevanten Formabweichungen durch den Fräsprozess infolge von Biegung zu erwarten (vgl. Kapitel 2.3.2). Im vorliegenden Fall wurde daher ein Spiel von 0,1mm gewählt und als umsetzbar erachtet.

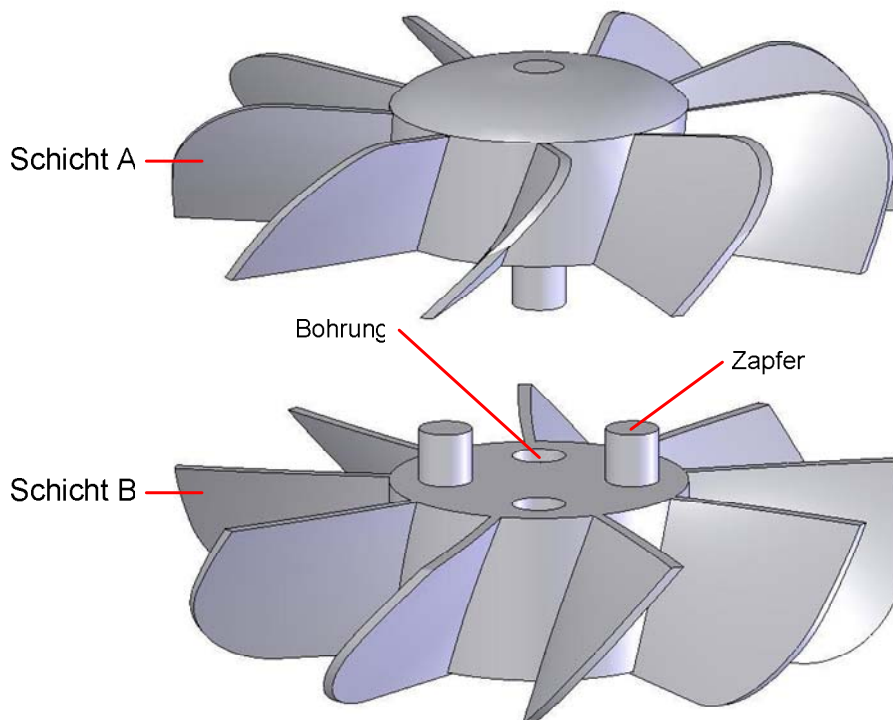


Abbildung 6-4: Erweiterung der Schichten um Bohrung-Zapfen-Kombinationen

Das kontextunabhängige Fügen beider Schichten wird mit einer zentralen Schraubverbindung realisiert. Dazu wird **Schicht A** mit einer Gewindebohrung und **Schicht B** mit einer Durchgangsbohrung versehen. Für die Umsetzung wird auf den Funktionsumfang von *SolidWorks* zurückgegriffen und der „Bohrungsassistent“ verwendet, mit welchem sich Bohrungen unterschiedlicher Ausprägung komfortabel erstellen lassen.

Zum Abschluss der datentechnischen Ausführung werden die Form und die Abmessungen des Rohmaterials festgelegt (vgl. Kapitel 2.2.3). Aufgrund der Geometrie des Probekörpers wird ein Rundmaterial verwendet, welches als Stangenware erhältlich ist. Die zur Verfügung stehenden Durchmesser werden in festen Abstufungen gemäß DIN 1013 T1 [25] angeboten. Da der Durchmesser der Probekörpers 110mm beträgt, wird die nächste Abstufung und damit ein Rohmaterialdurchmesser von 120mm gewählt.

Die Schnittstelle zwischen der datentechnischen und der fertigungstechnischen Ausführung ist die Erstellung der NC-Codes für Maschinensteuerung der CNC-Fräsmaschinen. Diese werden mittels einer CAM-Software aus den CAD-Modellen der Schichten abgeleitet (vgl. Kapitel 2.3.1). Vor dem Erzeugen der NC-Codes ist innerhalb der CAM-Software eine Rohmaterialdefinition anhand der getroffenen Form und Abmessungen erforderlich.

Die **Abbildung 6-5** zeigt die Benutzeroberfläche von *SolidWorks* sowie das darin integrierte Modul „CAM-Works“ zur Generierung der NC-Codes. Dargestellt ist der erste Fertigungsschritt für die **Schicht A** aus der Richtung der Unterseite.

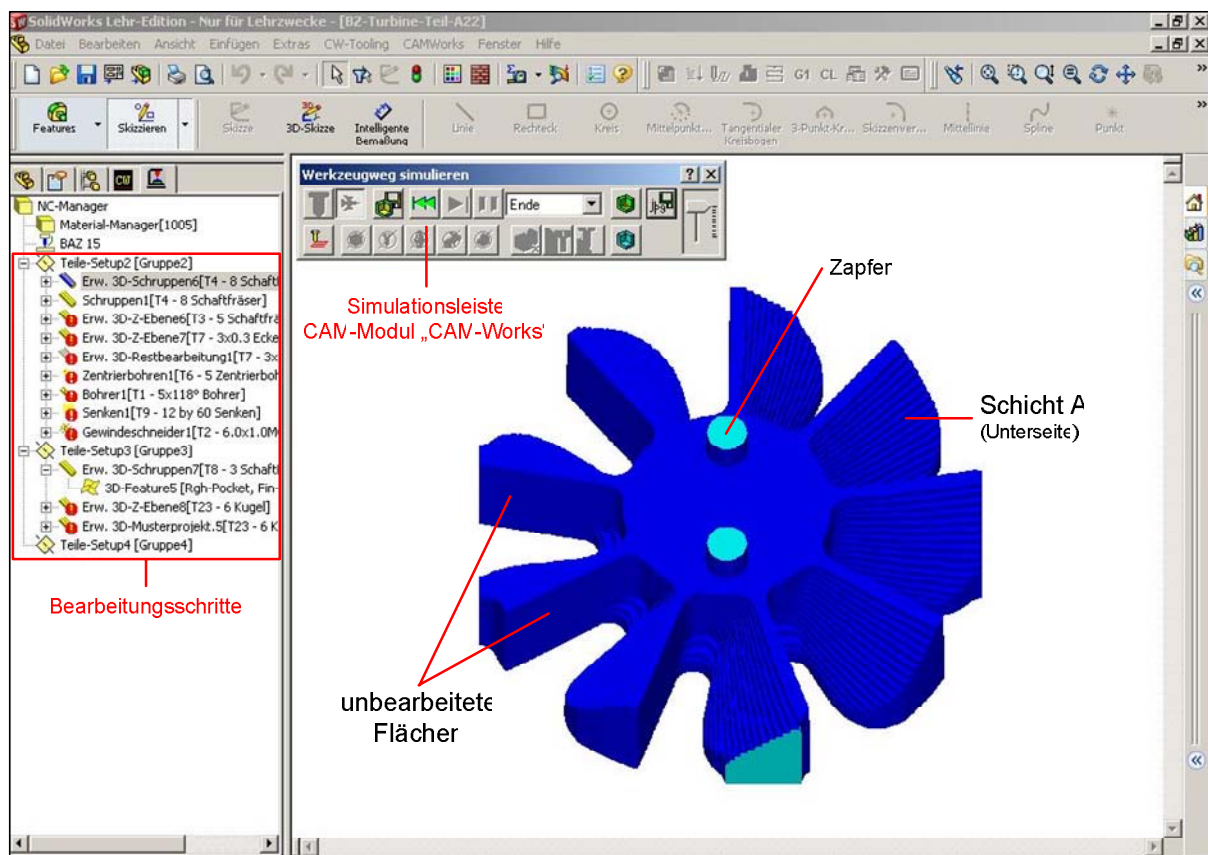


Abbildung 6-5: Simulation des ersten Bearbeitungsschrittes mittels CAM-Works

Dabei handelt es sich um den ersten Bearbeitungsvorgang „*Schruppen*“, bei dem die Geometrie des Probekörpers grob herausgearbeitet wird. Dies ist an den Flügelflächen bzw. an den Treppenstufen deutlich erkennbar. Die senkrechten unbearbeiteten Flächen an den Flügeln können erst bei der NC-Code-Erstellung für den zweiten Fertigungsschritt, aus der Richtung der Oberseite, bearbeitet werden. Aus diesem Grund müssen für eine zweiseitige Bauteilbearbeitung grundsätzlich die NC-Codes für die Fertigung aus der Richtung der Ober- und der Unterseite erzeugt werden.

6.1.2 Fertigungstechnische Ausführung

Zu Beginn des ersten Fertigungsschrittes der zweiseitigen Bauteilbearbeitung wird die Position des Rohmaterials auf dem Maschinentisch mittels eines 3D-Tasters bestimmt und die Koordinaten an die CNC-Steuerung der Fräsmaschine vom Typ *Alzmetall BAZ 15 CNC 60.40* übermittelt. Das Verfahren zur Bestimmung des Mittelpunktes des Rundmaterials geschieht analog zur beschriebenen Vorgehensweise in Kapitel 5.2.2.3. Die **Abbildung 6-6** zeigt das verwendete Rohmaterial, den Maschinenschraubstock mit der speziell für die Bohrung-Zapfen-Kombination entwickelten Vorrichtung und den 3D-Taster.

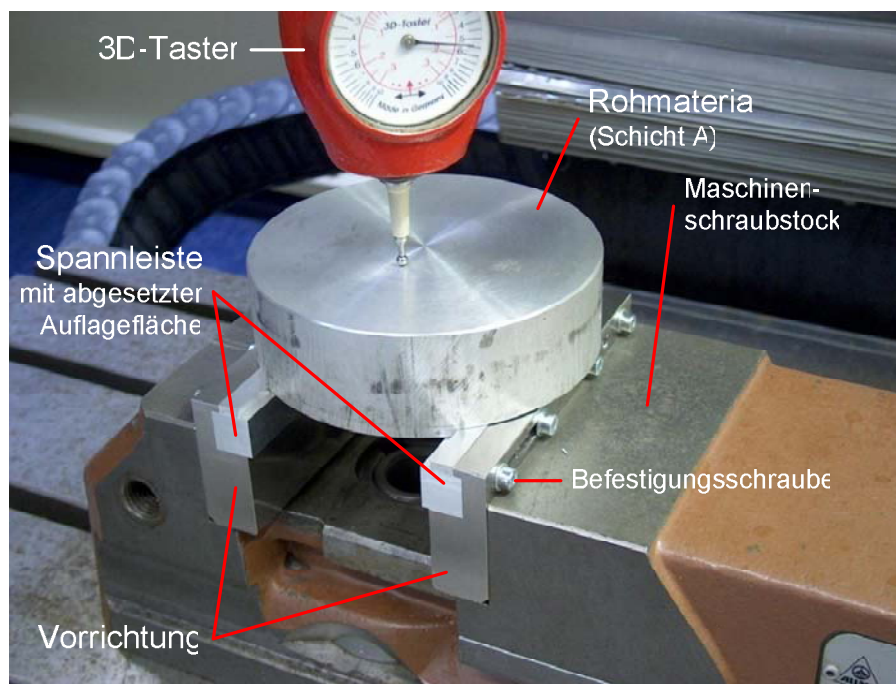


Abbildung 6-6: Einmessen des Rohmaterials

Damit das Rundmaterial in die Vorrichtung aufgenommen werden kann, wird diese mit Spannleisten der Form B (vgl. Kapitel 5.2.1.3) bestückt. Da es sich hierbei um keine prismatischen Aufnahmen handelt, ist das Rundmaterial im Vorfeld mit zwei parallelen Spannflächen zu versehen.

Die **Abbildung 6-7** zeigt den ersten Fertigungsschritt von **Schicht A** aus der Richtung der Unterseite. Hierbei zeigt die Fertigungsfolge 1 ein Bearbeitungsstadium zu Beginn der Herstellung, während die Fertigungsfolge 2 das Ende des ersten Fertigungsschrittes darstellt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Bohrungen erst gegen Ende aller Bearbeitungsvorgänge des ersten Fertigungsschrittes hergestellt werden.

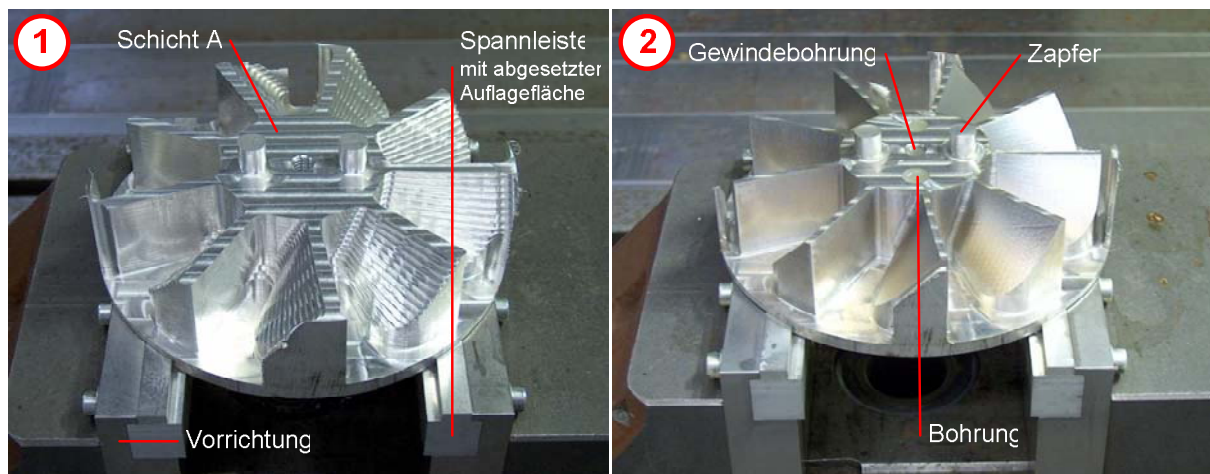


Abbildung 6-7: 1. Fertigungsschritt: Herstellung von Schicht A aus der Richtung der Unterseite

Im Anschluss an den ersten Fertigungsschritt wird der zweite und letzte Fertigungsschritt aus der Richtung der Oberseite durchgeführt. Dazu muss die **Schicht A** um 180° gedreht und auf den Zapfen gespannt werden. Dazu müssen die Spannleisten der Vorrichtung entfernt und durch die Spannbuchsenpaare ersetzt werden (vgl. Abbildung 5-14). Vor der frästechnischen Bearbeitung muss auch hier die Position der Schicht der Maschinensteuerung der Fräsmaschine übermittelt werden. Während die Bestimmung der Position vor dem ersten Fertigungsschritt am Rohmaterial vorgenommen werden konnte, ist dies vor dem zweiten Fertigungsschritt nicht immer möglich. Dies liegt daran, dass durch den ersten Fertigungsschritt Referenzflächen, welche mittels des 3D-Tasters angefahren werden können, nicht mehr existieren. Dieser Sachverhalt wird bei Betrachtung der durch den ersten Fertigungsschritt entstandenen komplexen Geometrie deutlich. Aus diesem Grund sieht das entwickelte MLJ-Vorrichtungskonzept grundsätzlich die Möglichkeit vor, von der Position der Vorrichtung auf die Position der Schicht schließen zu können. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.2.1.3 beschriebenen geometrischen Eigenschaften der

Teilspannbuchsen kann die Position des fixen Spannbuchsenpaares mittels des 3D-Tasters bestimmt werden.

Die **Abbildung 6-8** zeigt die entwickelte Vorrichtung mit dem beweglichen und dem fixen Spannbuchsenpaar. Werden die Spannbuchsenpaare für die Fertigung neu hergestellt, so erübrigt sich die Positionsbestimmung des fixen Spannbuchsenpaares für den nachfolgenden Bearbeitungsschritt, da beim Einbringen der Bohrungen die Koordinaten gespeichert und wieder verwendet werden können. Erst wenn die Position des Schraubstocks oder des fixen Spannbuchsenpaares verändert wird, ist eine neue Lagebestimmung mittels des 3D-Tasters notwendig.

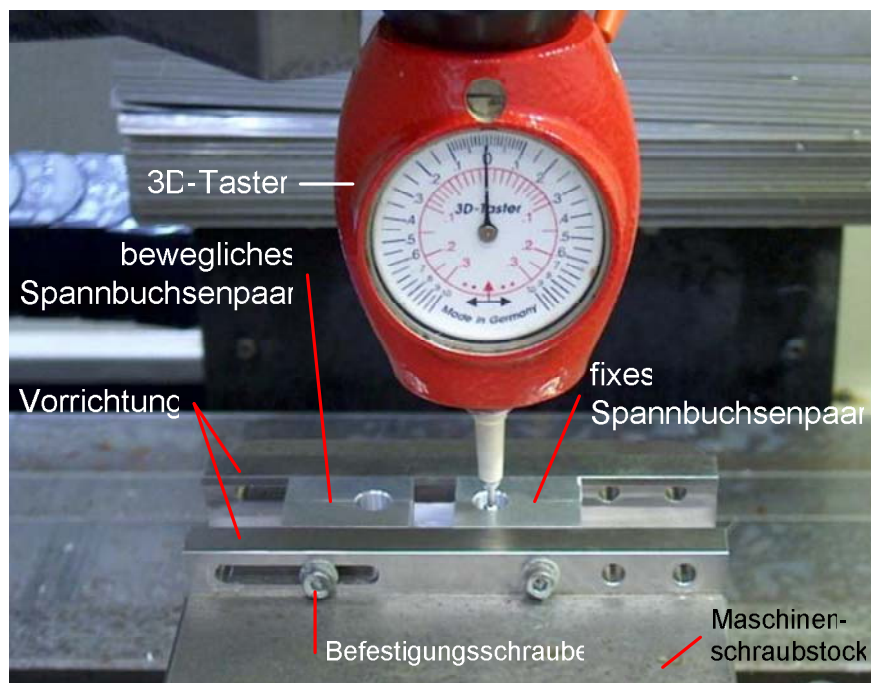


Abbildung 6-8: Einmessen der Vorrichtung zur Aufnahme der Schicht

Beim Einbringen der Bohrungen in die Spannbuchsenpaare ist darauf zu achten, dass ein Spalt von 0,1mm – 0,2mm für den Spannungsbereich berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 5.2.1.3). Das Einstellen des Spaltes kann mit Hilfe einer Lehre vorgenommen werden. In der Praxis hat sich auch die Verwendung eines Blatt Papiers als ausreichend genau herausgestellt. Der Spalt sollte nicht zu groß gewählt werden, da dies zu plastischen Verformungen an den Zapfen führen kann. Bei dem in der datentechnischen Ausführung gewählten Spiel von 0,1mm zwischen Zapfen und Bohrungen könnte dies dazu führen, dass die Schichten im Anschluss an die Fertigung nicht mehr gefügt werden können. Zudem sollten plastische Verformungen grundsätzlich vermieden werden.

Im Anschluss daran wird die letzte Bearbeitung der **Schicht A** aus der Richtung der Oberseite durchgeführt. Die **Abbildung 6-9** zeigt dazu das Anfangs- und Endstadium des zweiten Fertigungsschrittes. Deutlich zu erkennen sind die im Vorfeld für den ersten Fertigungsschritt hergestellten parallelen Spannflächen.

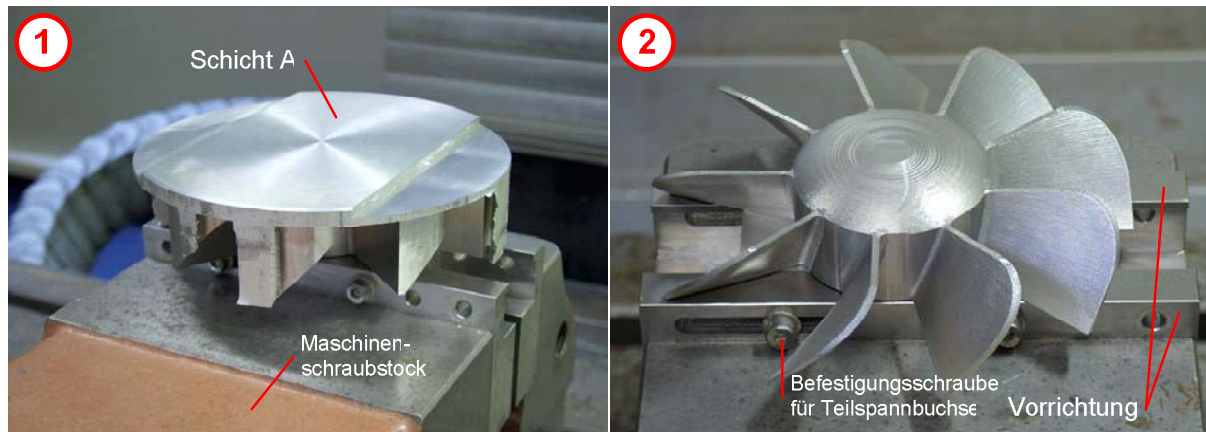


Abbildung 6-9: 2. Fertigungsschritt: Herstellung von Schicht A aus der Richtung der Oberseite

Die **Abbildung 6-10** zeigt die fertig hergestellten Schichten des komplexen Probekörpers. Neben den Bohrungen und Zapfen ist die Durchgangsbohrung an **Schicht B** zum kontextunabhängigen Fügen (vgl. Kapitel 5.2) zu erkennen. Im Gegenzug dazu besitzt die **Schicht A** passend die Gewindebohrung (vgl. Abbildung 6-7).

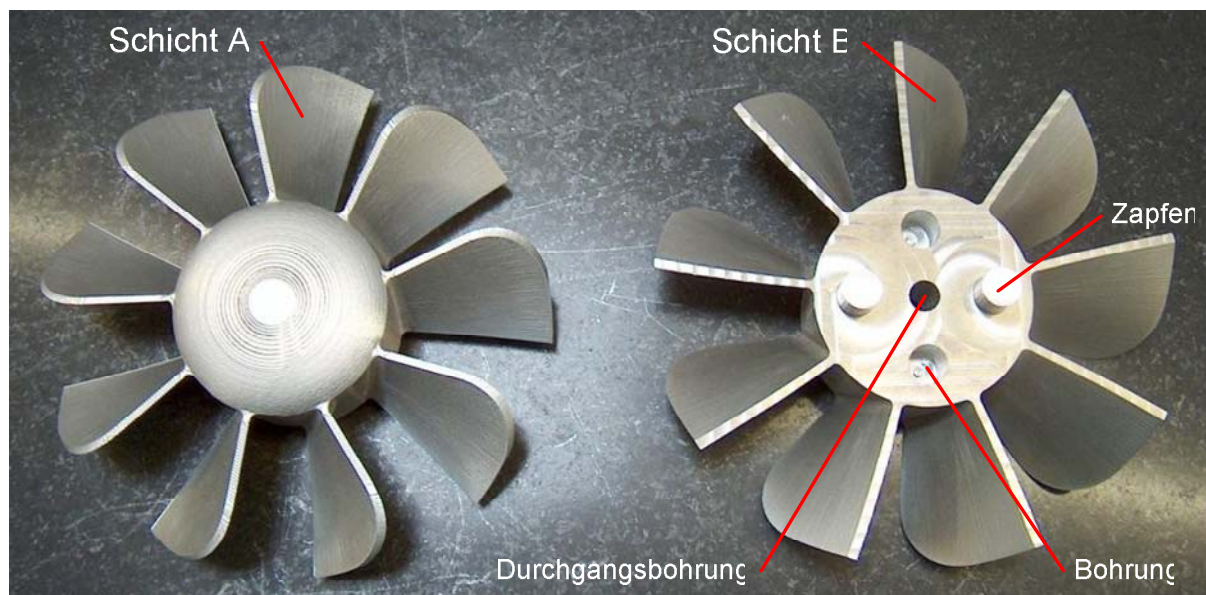


Abbildung 6-10: frästechnisch hergestellte Schichten des Probekörpers mit Bohrung-Zapfen-Kombination

Zum Fügen beider Schichten werden diese mittels einer Innensechskantschraube verbunden (siehe **Abbildung 6-11**). Die Bohrung-Zapfen-Kombinationen positionieren dabei beide

Schichten untereinander. Durch das erforderliche Spiel ist die Positioniereigenschaft jedoch nur suboptimal (vgl. Kapitel 2.4.1).

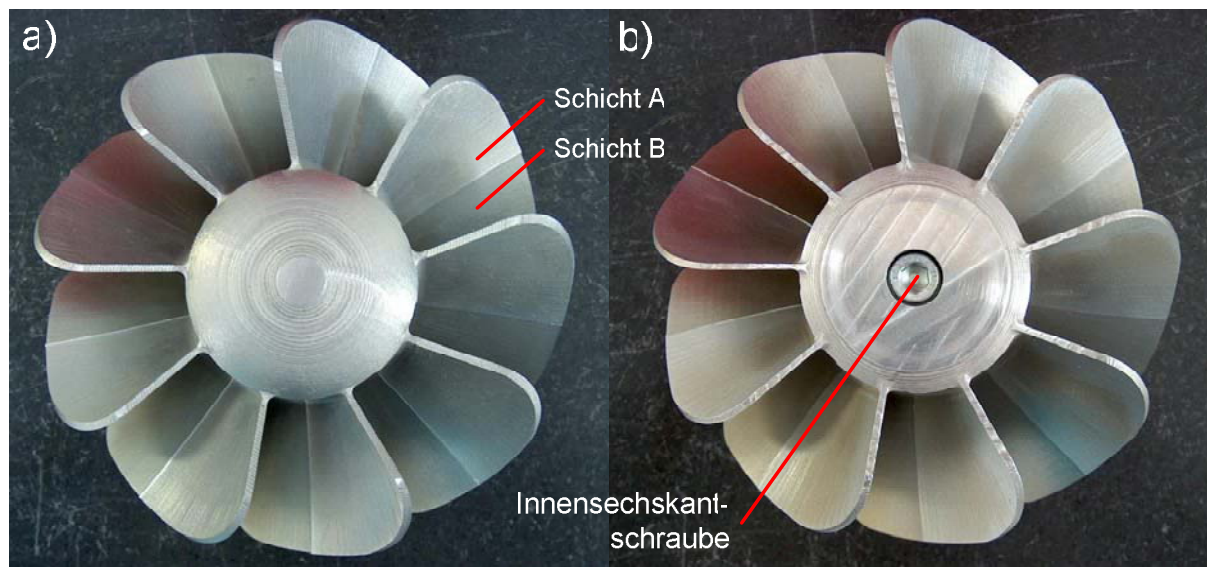


Abbildung 6-11: gefügter Probekörper: a) Draufsicht b) Unteransicht

Charakteristisch für das Fügen mittels der Bohrung-Zapfen-Kombination sind die bündig aufeinander aufliegenden Schichten des Prototyps (vgl. **Abbildung 6-12**).

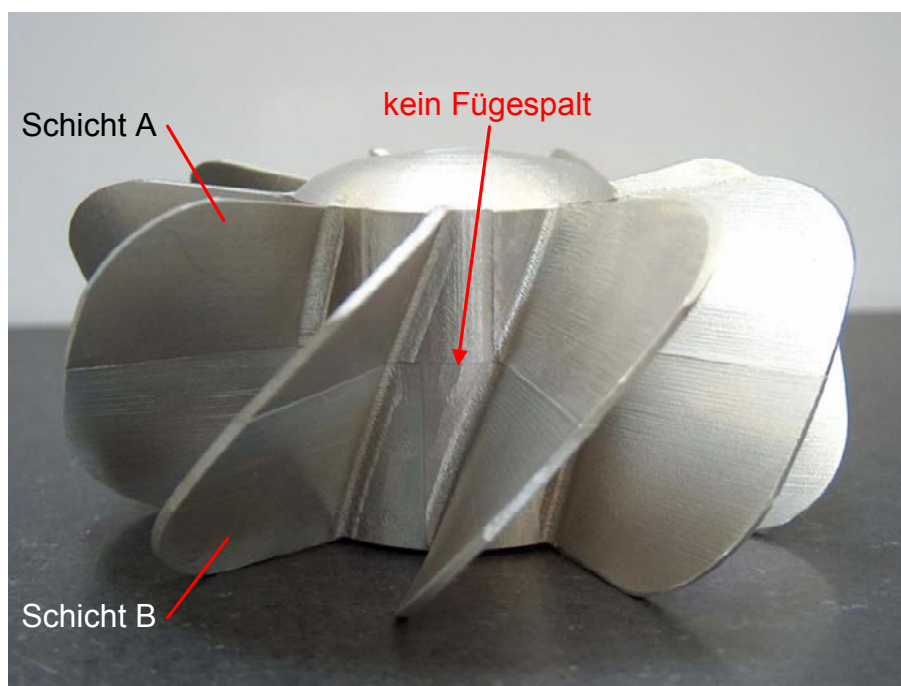


Abbildung 6-12: Bohrung-Zapfen-Kombination: kein Fügespalt zwischen den Schichten

6.2 Beispiel 2: Komplexer Probekörper mit Prismen-Verzahnung

Im Folgenden wird der komplexe Probekörper unter Verwendung der Prismen-Verzahnung als MLJ-Fügetechnik hergestellt. Der aus Kapitel 6.1 ermittelte Wert für die Schnitttiefe wird als Eingangsgröße für das Programm-Modul genutzt. Das Fügen der Schichten geschieht ebenfalls kontextunabhängig.

6.2.1 Datentechnische Ausführung

Die **Abbildung 6-13** zeigt die Benutzeroberfläche von *SolidWorks*, den komplexen Probekörper sowie das Prismen-Verzahnungs-Tool. Das Programm-Modul wird über das *Icon* (rot gekennzeichnet) in der Menüleiste von *SolidWorks* aktiviert.

Vor der eigentlichen Anwendung des Moduls sind Angaben zur der Position und der Geometrie der Prismen-Verzahnung vorzunehmen. Diese sind notwendig für die Durchführung der Hauptfunktionen

- Festigkeitsnachweis und
- Einfügen der *Prismen-Verzahnung* & Trennen des *Prototyps in einzelne Schichten*.

Für die Positionierung der Prismen-Verzahnung ist die Auswahl einer Referenzachse, einer Referenzebene bzw. -fläche sowie die Angabe der Schnitttiefe erforderlich (vgl. Kapitel 5.3.1). Da keine Referenzachse vorliegt, ist diese mittels der Funktionalitäten des CAD-Systems zu generieren. Im Gegensatz dazu liegt eine bereits nutzbare Referenzfläche am CAD-Modell vor (vgl. Abbildung 6-13). Beide Referenzelemente werden interaktiv per Mausklick an das Programm-Modul übertragen. Ausgehend von der gewählten Referenzfläche wird die Schnitttiefe, in der das CAD-Modell durchgeschnitten und die Prismen-Verzahnung eingefügt werden soll, in das entsprechende Eingabefeld eingegeben.

Nachdem die erforderlichen Angaben zur Position der Prismen-Verzahnung getroffen worden sind, werden im nächsten Schritt die Verzahnungsparameter festgelegt (vgl. Abbildung 6-13). Diese können jedoch zu einem späteren Zeitpunkt nochmals überprüft und gegebenenfalls variiert werden.

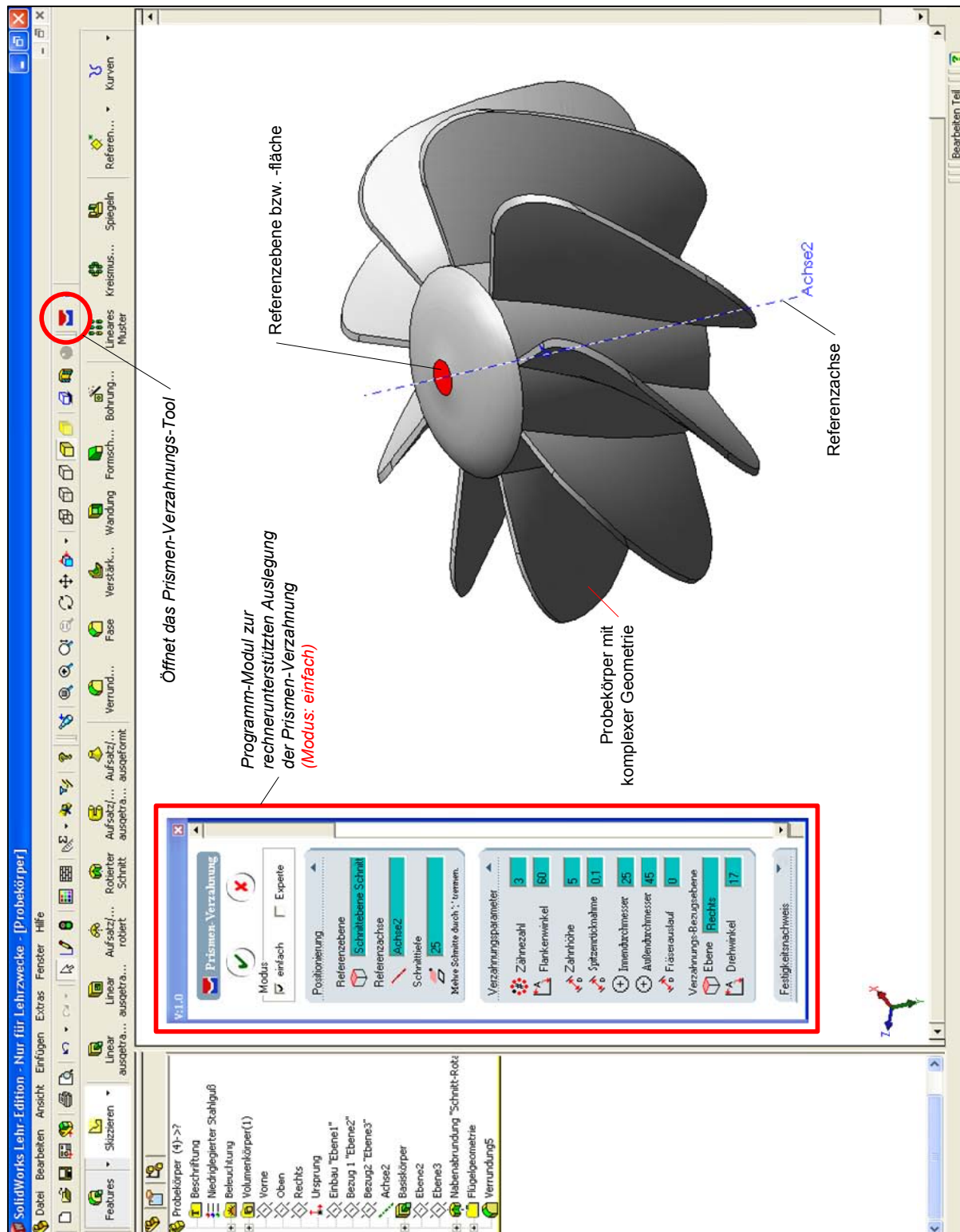


Abbildung 6-13: Anwendungsszenario des Prismen-Verzahnungs-Tools am Beispiel eines Probekörpers

Im Anschluss daran folgt der rechnerunterstützte Festigkeitsnachweis der Prismen-Verzahnung auf der Basis der in Kapitel 5.2.2.2 beschriebenen Berechnungsgrundlagen.

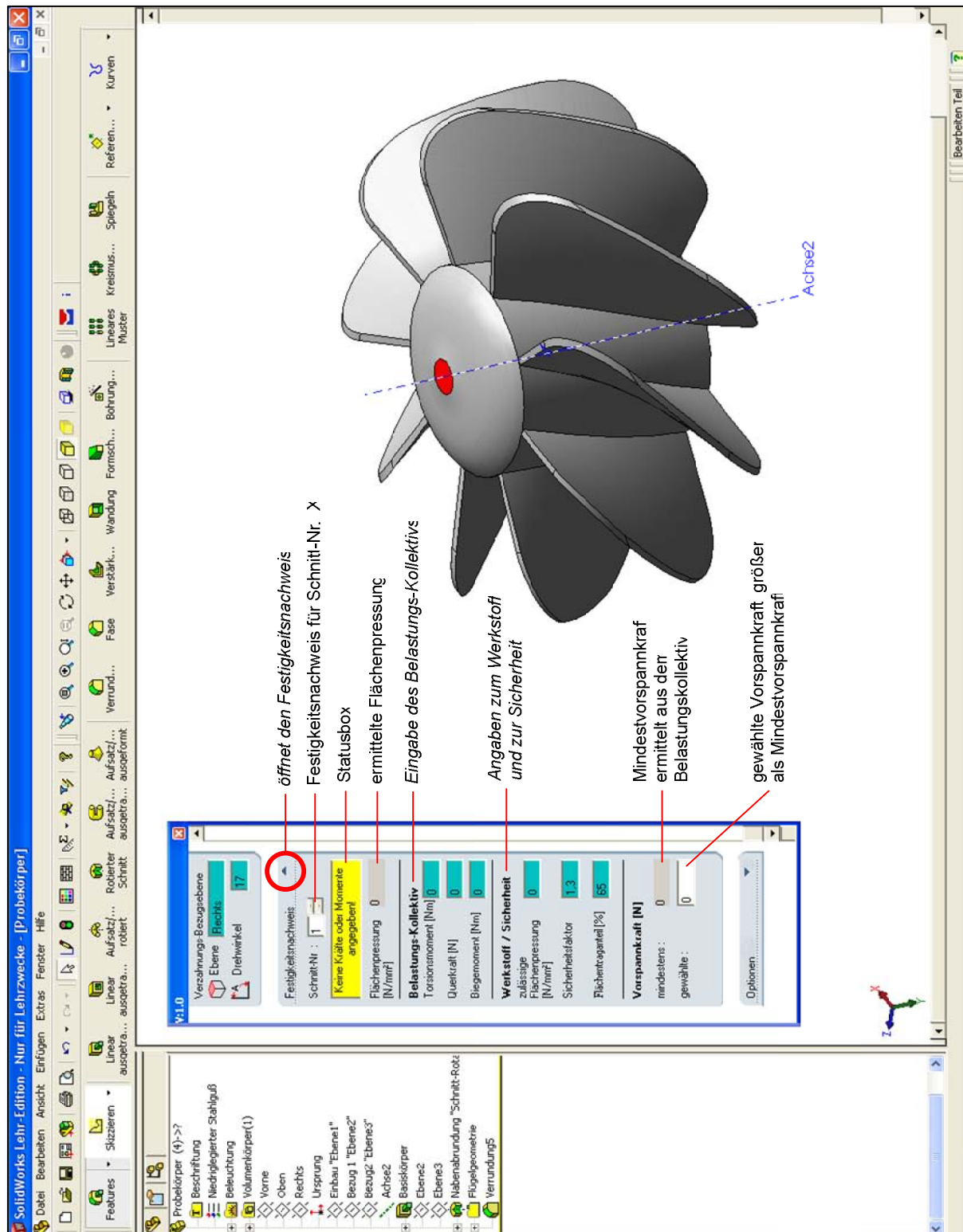


Abbildung 6-14: Festigkeitsnachweis des Prismen-Verzahnungs-Tools am Beispiel eines Probekörpers

Dazu wird zuerst der Umgang mit dem Programm-Modul beispielhaft anhand einer Torsionsbelastung erläutert und abschließend die Prismen-Verzahnung infolge der auftretenden mechanischen Belastungen durch den Fräsprozess nachgerechnet.

Die **Abbildung 6-14** zeigt innerhalb der *SolidWorks*-Oberfläche den geöffneten Festigkeitsnachweis des Programm-Moduls. Die rechnerunterstützte Auslegung bezieht sich auf folgende, zuvor angegebene, Verzahnungsparameter (vgl. Abbildung 6-13):

- Zähnezahl = 3
- Flankenwinkel = 60°
- Zahnhöhe = 5mm
- Spitzenrücknahme = 0,1mm
- Innendurchmesser = 25mm
- Außendurchmesser = 45mm

Es wird eine Torsionsbelastung M_t von 100 Nm angenommen, welche auf die Prismen-Verzahnung gemäß Abbildung 5-27 einwirkt. Diese wird in das entsprechende Feld des Belastungs-Kollektivs eingetragen. Im Anschluss daran werden die Angaben zum Werkstoff und zur Sicherheit (vgl. **Abbildung 6-15a**) getätigt. Neben der zulässigen Flächenpressung von 230N/mm^2 des gewählten Werkstoffs *AlMgSi 1* werden dort ein Sicherheitsfaktor von 1,3 sowie ein Flächentraganteil für gefräste Oberflächen von 65% angegeben [18].

Das Programm-Modul ermittelt aus der angegebenen Torsionsbelastung M_t die daraus resultierende Flächenpressung (vgl. Gl. 5-12) sowie die Mindestvorspannkraft, die ein Auseinandergleiten der Prismen-Verzahnung verhindert (vgl. Gl. 5-17). Im Eingabefeld der Vorspannkraft ist abschließend die gewählte Vorspannkraft einzutragen, welche größer als die Mindestvorspannkraft sein muss. Daraufhin wird die zuvor ermittelte Flächenpressung unter Berücksichtigung der gewählten Vorspannkraft aktualisiert. Kommt es dabei zu einer Überschreitung der zulässigen Flächenpressung, wird dies in der Status-Box angezeigt (vgl. **Abbildung 6-15b**). Eine Erhöhung der ertragbaren Flächenpressung kann grundsätzlich durch eine Vergrößerung der Zahnflankenfläche oder die Wahl eines anderen Werkstoffs vorgenommen werden.

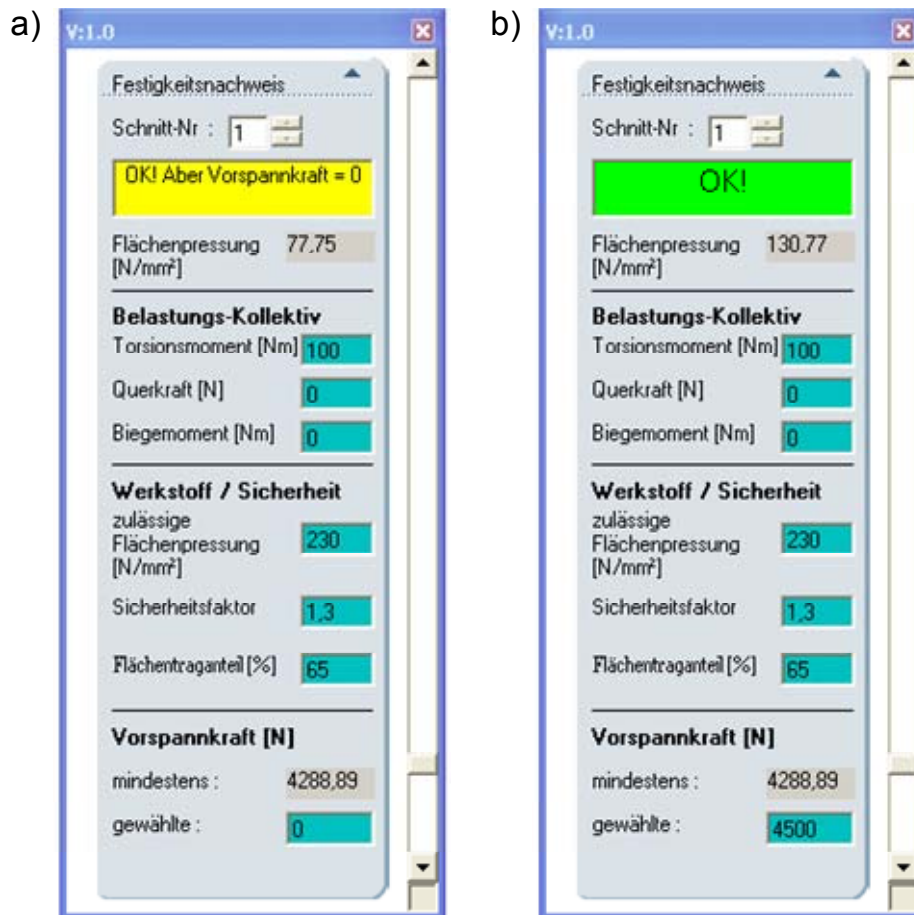


Abbildung 6-15: a) Ermittlung der Mindestvorspannkraft b) Eingabe der gewählten Vorspannkraft

Für die Auslegung der Fügetechnik anhand der auftretenden Belastungen infolge der Fräsbearbeitung sind Kenntnisse über Größe und Richtung der Zerspankraftkomponenten erforderlich. Besonders wichtige Komponenten sind in diesem Zusammenhang die Vorschubkraft F_f und die Passivkraft F_p , welche für die Berechnung von Werkzeugen und Werkzeugspanneinrichtungen herangezogen werden. Im Gegensatz dazu ist die Schnittkraft F_c , welche für das tatsächliche Abheben des Spanes verantwortlich ist, für die Leistungsberechnung und kräftemäßige Auslegung von Werkzeugmaschinen von Bedeutung [26].

Die **Abbildung 6-16** zeigt beispielhaft an einer Schicht mit Prismen-Verzahnung die Vorschubkraft F_f und die Passivkraft F_p am Kraftangriffspunkt P . Für die Auslegung der Prismen-Verzahnung sind die angreifenden Kräfte aufgrund ihres Hebelarms auf die Grundbelastungsarten gemäß Kapitel 5.2.2.2 zurückzuführen. Die Vorschubkraft F_f ergibt dabei eine Querkraft F_q , ein Torsionsmoment M_t sowie ein Biegemoment M_b und die Passivkraft F_p eine Druckkraft F_d , gleichgerichtet zur Vorspannkraft F_v , und ein Biegemoment M_b .

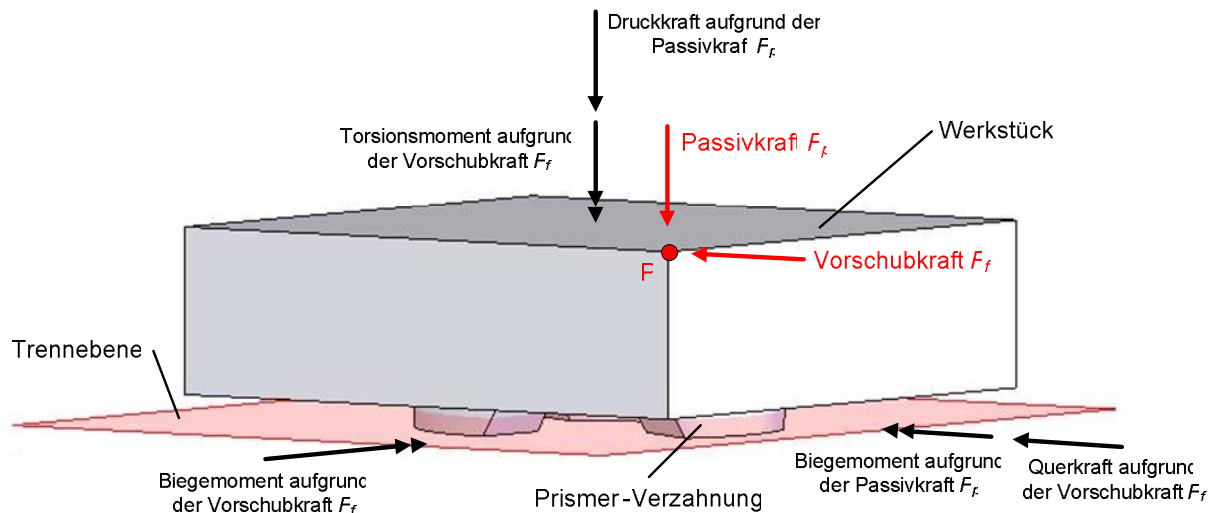


Abbildung 6-16: aus der Vorschubkraft F_f und Passivkraft F_p resultierende Kräfte und Momente

Die Berechnung der Zerspankraftkomponenten erfolgt nach *Kienzle* und *Victor* mit Hilfe von empirischen Formeln, werkstoffspezifischen Zerspankrafttabellen und Korrekturfaktoren [27] [28]. Für eine Abschätzung der Zerspankräfte ist besonders der Korrekturwert für den Werkzeugverschleiß zu beachten. Sein Einfluss kann zu einer Belastungserhöhung von bis zu 50% und mehr führen [29]. Der Nachteil der Tabellen liegt darin, dass diese nicht stetig um fehlende und neue Werkstoffe ergänzt werden. In der gängigen Literatur wird bis heute auf ein Tabellenwerk [30] von *König* und *Essel* aus dem Jahre 1982 verwiesen. Im vorliegenden Fall musste daher für die Berechnung auf die spezifischen Zerspankraftkomponenten einer vergleichbaren Aluminiumlegierung zurückgegriffen werden.

Die Zerspankräfte sind neben dem Werkstoff und den Korrekturfaktoren zudem abhängig von

- der Drehzahl,
- der Vorschubgeschwindigkeit,
- der Schnitttiefe und
- der Art und Beschaffenheit des Werkzeugs [27][28].

Für die rechnerunterstützte Auslegung der Prismen-Verzahnung wird ein Schrappvorgang betrachtet, da dort aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeit, der hohen Schnitttiefe und des großen Fräserdurchmessers die größten Zerspankräfte zu erwarten sind. Für die Bearbeitung wurde folgender Fräser verwendet und folgende Prozessparameter eingestellt:

- Fräserart: Vollhartmetall-Schaftfräser (mit scharfen Schneiden)
- Fräserdurchmesser D : 20mm

- Anzahl der Schneiden z_w : 4
- Einstellwinkel κ : 70°
- Schnitttiefe a_p : 3mm
- Vorschub pro Zahn f_z : 0,12mm
- Eingriffswinkel φ_s : 90°

Die Ermittlung der Zerspankräfte für den Ersatzwerkstoff *AlMg4SiMn* ergab

- eine Vorschubkraft $F_f = 130\text{N}$
- und eine Passivkraft $F_p = 78\text{N}$.

Die Zurückführung der Zerspankräfte auf die Grundbelastungsarten gemäß Abbildung 6-16 ergibt unter Berücksichtigung der Rohmaterialabmessungen (*Durchmesser = 120mm; Höhe = 30mm*) folgende Kräfte und Momente:

aus der Vorschubkraft F_f resultierend:

- Querkraft $F_q = 130\text{N}$
- Torsionsmoment $M_t = 7,8\text{Nm}$
- Biegemoment $M_b = 3,9\text{Nm}$

aus der Passivkraft F_p resultierend:

- Druckkraft $F_d = 78\text{N}$
- Biegemoment $M_b = 4,68\text{Nm}$

Die **Abbildung 6-17** zeigt die aus den auftretenden Belastungen ermittelte Flächenpressung und Mindestvorspannkraft. Die resultierende Flächenpressung ist für den Werkstoff *AlMgSi 1* zulässig. Im Gegensatz dazu ist die erforderliche Mindestvorspannkraft für das verwendete Exzenter-Spannsystem als problematische einzustufen, da dieses nur eine Vorspannkraft von ca. 3kN aufbringen kann (vgl. Kapitel 5.2.2.3). Um ein Versagen des Systems zu verhindern, sollten die Zerspanungskräfte durch eine Variation der Prozessparameter reduziert werden. Dies kann beispielsweise durch Herabsetzen der Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden.

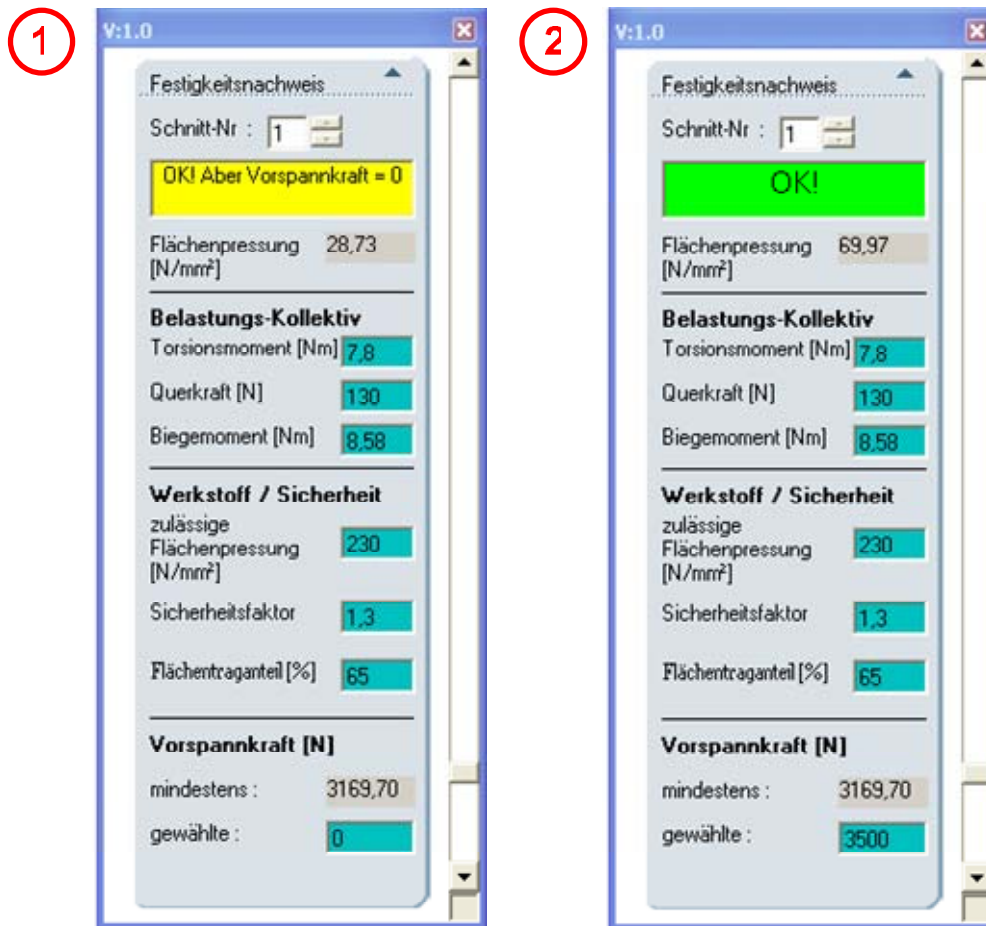


Abbildung 6-17: rechnerunterstützte Auslegung der Prismenverzahnung anhand der Zerspankräfte

Zum Schluss der datentechnischen Ausführung erfolgen das Einfügen der Prismen-Verzahnung sowie das Trennen des CAD-Modells in Schichten. Da im Vorfeld dazu bereits alle notwendigen Informationen an das Programm-Modul übermittelt worden sind (vgl. Abbildung 6-13), kann der Vorgang direkt über die Bestätigung des „OK-Button“ ausgelöst werden.

Im ersten Schritt erfolgt das Erstellen von **Schicht A**. Danach hält das Programm-Modul automatisch an und der Benutzer hat die Möglichkeit zur Variation der Geometrieparameter. Auf diese Weise kann z.B. eine individuelle Anpassung der Prismen-Verzahnung an die Geometrie des Prototyps vorgenommen werden (vgl. **Abbildung 6-18**). Werden Geometrieparameter nachträglich geändert, so wird automatisch der Festigkeitsnachweis aktualisiert.

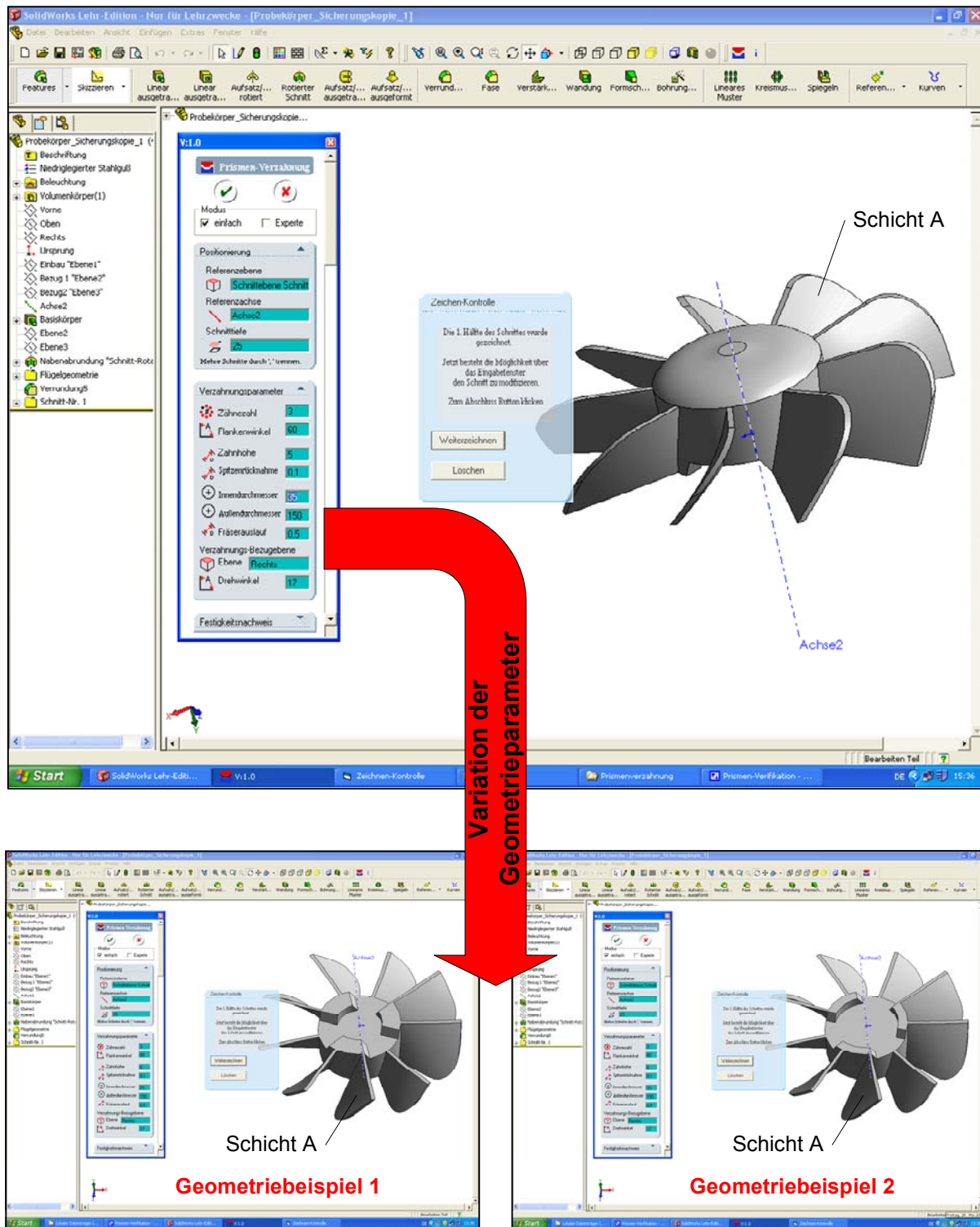


Abbildung 6-18: Schicht A: Möglichkeit zur Variation der Geometrieparameter

Entspricht die Geometrie der Prismen-Verzahnung den Anforderungen des Benutzers, so kann der Ablauf des Programm-Moduls fortgesetzt und es kann die zweite und letzte **Schicht B** erzeugt werden (vgl. **Abbildung 6-19**). Die Schichten werden gemäß der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Dateistruktur abgelegt.

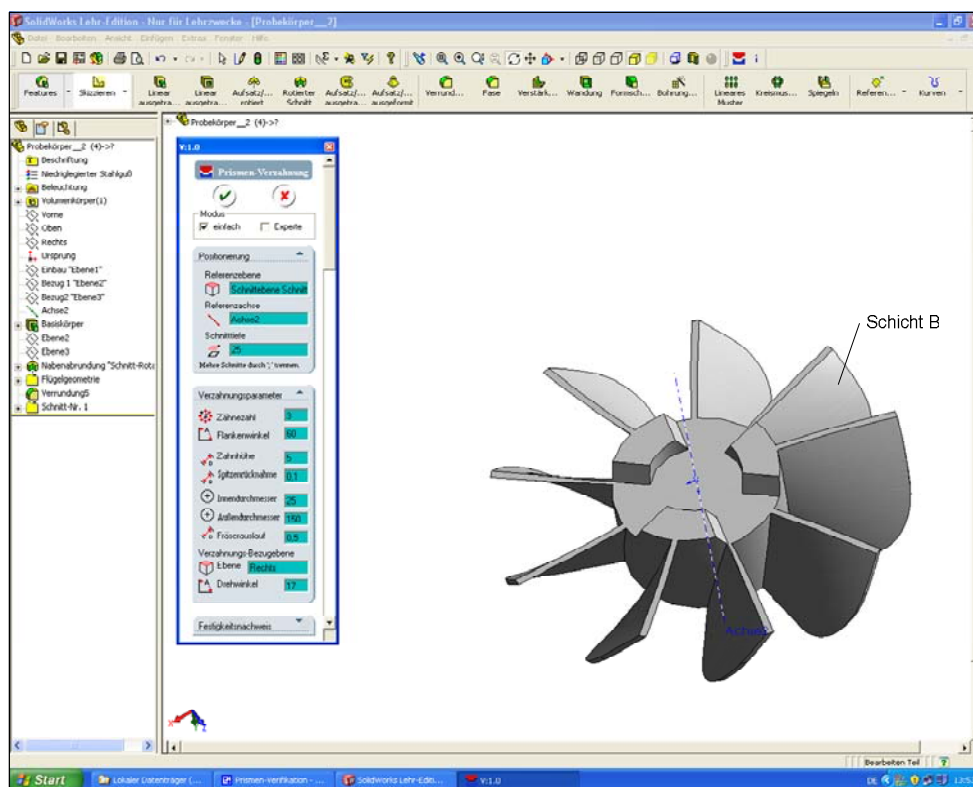


Abbildung 6-19: Schicht B: Übernahme der Geometrieparameter von Schicht A

Zur Überprüfung der datentechnischen Ausführung können beide Schichten innerhalb einer Baugruppenkonstruktion zusammengesetzt werden. Die **Abbildung 6-20** zeigt die dabei entstehende Baugruppe aus **Schicht A** und **Schicht B**. Es ist deutlich die umlaufende Trennlinie der Prismen-Verzahnung zu erkennen.

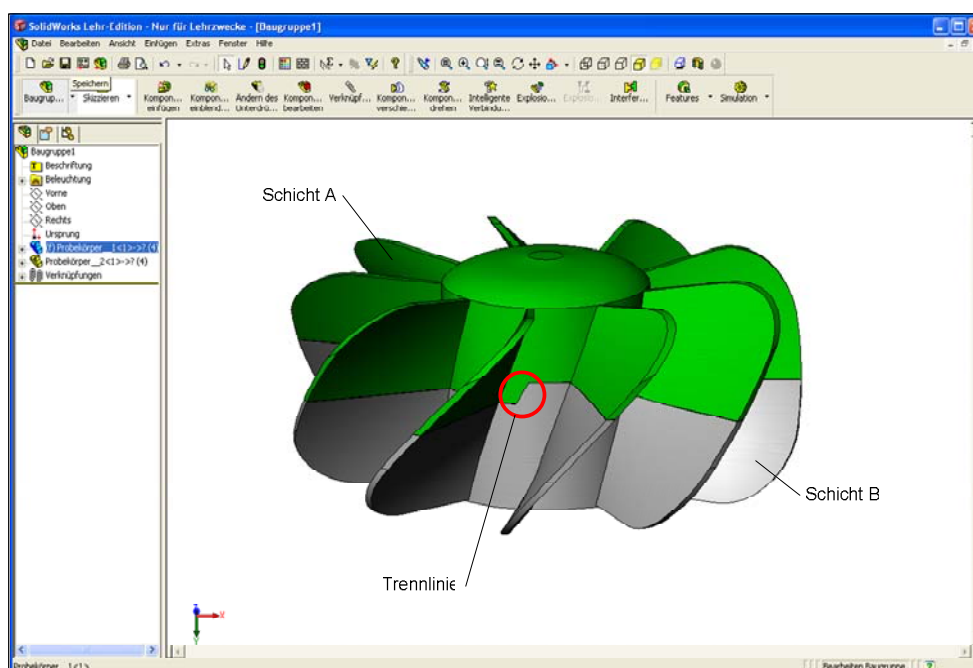


Abbildung 6-20: Baugruppendarstellung beider Schichten

Im Gegensatz dazu lässt sich eine bereits in Kapitel 5.3.1 vorgestellte Anwendungsvariante der Prismen-Verzahnung mit Hilfe des Programm-Moduls erzeugen (vgl. Abbildung 5-41). Dazu wird beispielsweise nach dem automatischen Programmstopp der Außendurchmesser der Verzahnung so gewählt, dass dieser im Inneren des Prototyps liegt. Bei dieser Variante ist unbedingt ein Fräserauslauf zu berücksichtigen (vgl. **Abbildung 6-21**). Der Vorteil dieser Variante liegt darin, dass im Gegensatz zur „Standardausprägung“ eine Ausrichtung der Verzahnung mittels des Drehwinkels gegenüber der Flügelgeometrie entfällt. Dem stehen jedoch eine verminderte Flankenfläche aufgrund des Fräserauslaufs gegenüber, und dadurch eine geringere Übertragung von mechanischen Belastungen. In der Baugruppenkonstruktion ergibt sich demnach eine gerade umlaufende Trennlinie.

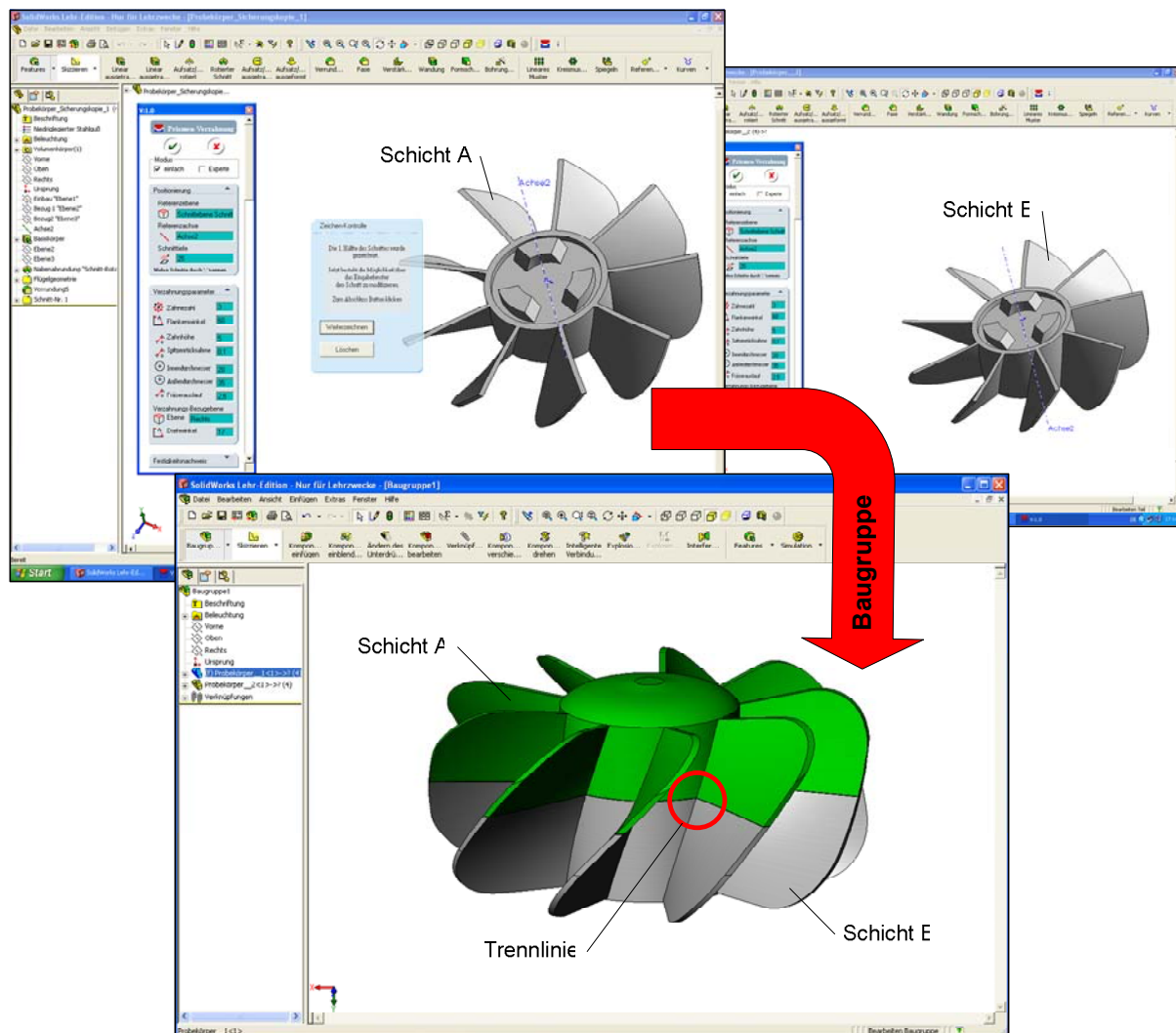


Abbildung 6-21: Anwendungsvariante: Prismen-Verzahnung mit Fräserauslauf

Für das kontextunabhängige Fügen mittels einer zentralen Schraubverbindung wird die **Schicht A** mit einer Gewindebohrung und die **Schicht B** mit einer Durchgangsbohrung versehen. Hierfür wird wie im ersten Beispiel der Bohrungsassistent von *SolidWorks* verwendet.

Für die fertigungstechnische Ausführung werden aus den CAD-Modellen beider Schichten die NC-Codes mittels *CAM-Works* abgeleitet.

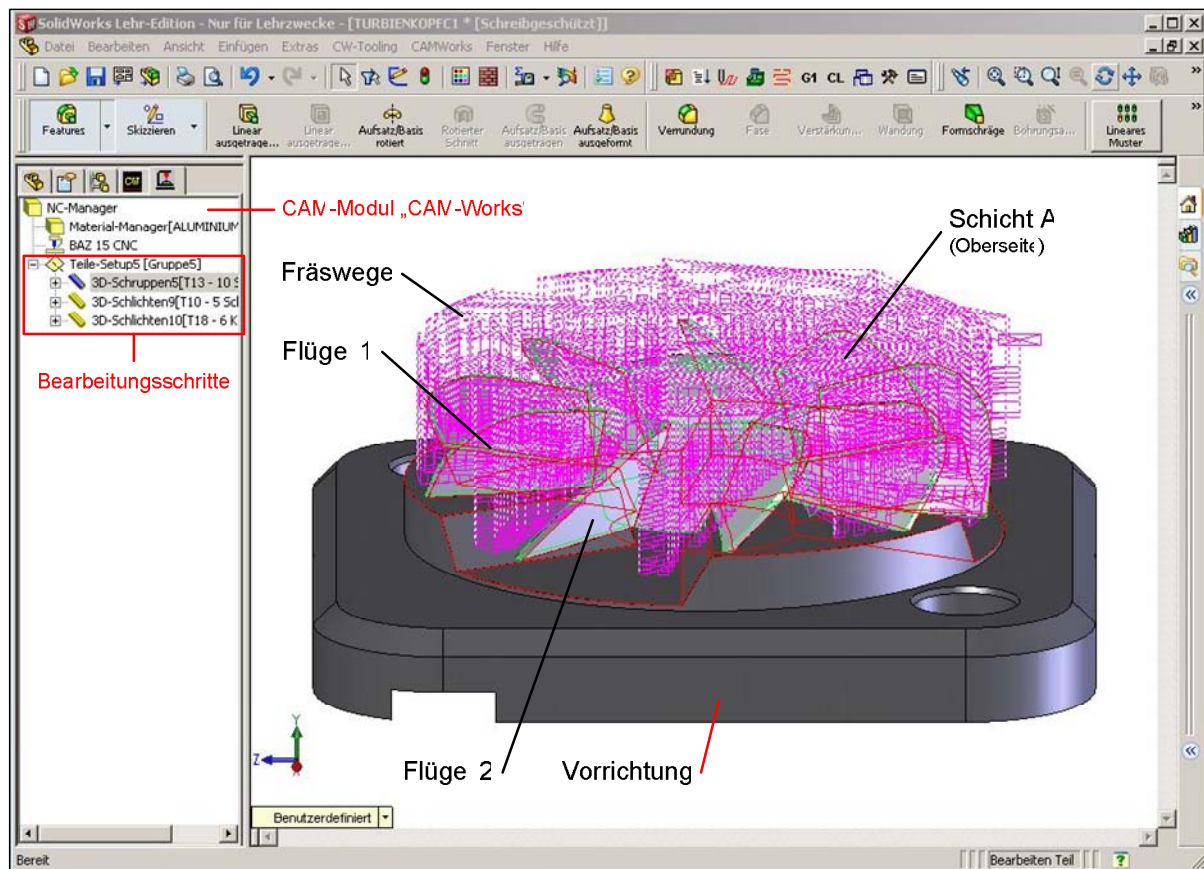


Abbildung 6-22: Berücksichtigung der Vorrichtung bei der Erstellung des NC-Codes der Schicht A

Die **Abbildung 6-22** zeigt die NC-Code-Erstellung der **Schicht A** aus der Richtung der Oberseite. Bedingt durch die Prismen-Verzahnung befindet sich die Geometrie der einzelnen Flügel auf unterschiedlichen Höhenniveaus (siehe Flüge 1 und Flügel 2). Um eine Kollision zwischen Bearbeitungswerkzeug und Vorrichtung zu vermeiden, ist es notwendig, dass die Vorrichtung bei der NC-Code-Generierung Berücksichtigung findet.

6.2.2 Fertigungstechnische Ausführung

Im ersten Fertigungsschritt wird das Rohmaterial in einem konventionellen Maschinenschraubstock aufgenommen und die Position mittels eines 3D-Tasters bestimmt (vgl. Kapitel 6.1).

Die **Abbildung 6-23** zeigt die frästechnische Herstellung der **Schicht A** aus der Richtung der Unterseite. Neben der Herstellung der Geometrie wird auch die Prismen-Verzahnung erzeugt. Wie auch bei dem vorherigen Beispiel wird zur frästechnischen Herstellung des Prototyps das Bearbeitungszentrum vom Typ *Alzmetall BAZ 15 CNC 60.40* verwendet.

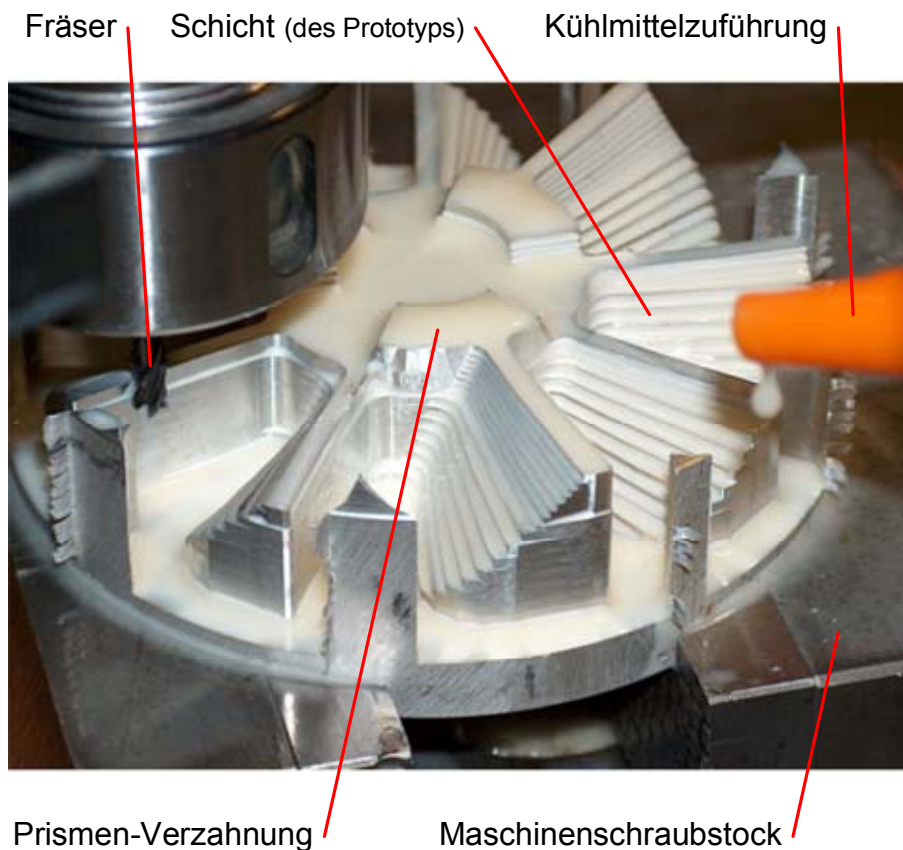


Abbildung 6-23: 1. Fertigungsschritt: Herstellung von Schicht A aus der Richtung der Unterseite

Nach der Beendigung des ersten Fertigungsschrittes muss die Schicht abschließend aus der Richtung der Oberseite bearbeitet werden. Dazu wird die Schicht um 180° gedreht und mittels der speziell für die Prismen-Verzahnung entwickelten Vorrichtung aufgenommen und gespannt (vgl. Kapitel 5.2.2.3). Durch den Umspannvorgang muss die Position der Schicht erneut bestimmt werden. Dazu wird mit Hilfe des Referenzkörpers von der Position der Vorrichtung auf die Position der Schicht geschlossen (vgl. Abbildung 5-36).

Die **Abbildung 6-24** zeigt die Vorrichtung, den Referenzkörper sowie den 3D-Taster für die Positionsbestimmung. Der Referenzkörper dient für die Ermittlung des Nullpunktes, welcher sich im Zentrum der Vorrichtung befindet. Die Orientierung der Vorrichtung auf dem Maschinentisch ist durch die Verwendung von Passsteinen grundsätzlich gegeben. Für eine exakte Prototypenfertigung empfiehlt es sich jedoch, die Orientierungsbestimmung messtechnisch mit Hilfe des 3D-Tasters an einer beliebigen äußeren Seitenfläche der Vorrichtung vorzunehmen. Die ermittelten Positionsdaten werden daraufhin an die Maschinensteuerung übertragen, womit die eindeutige Position der Vorrichtung bzw. der Schicht für die Fräsmaschinen erkennbar ist.

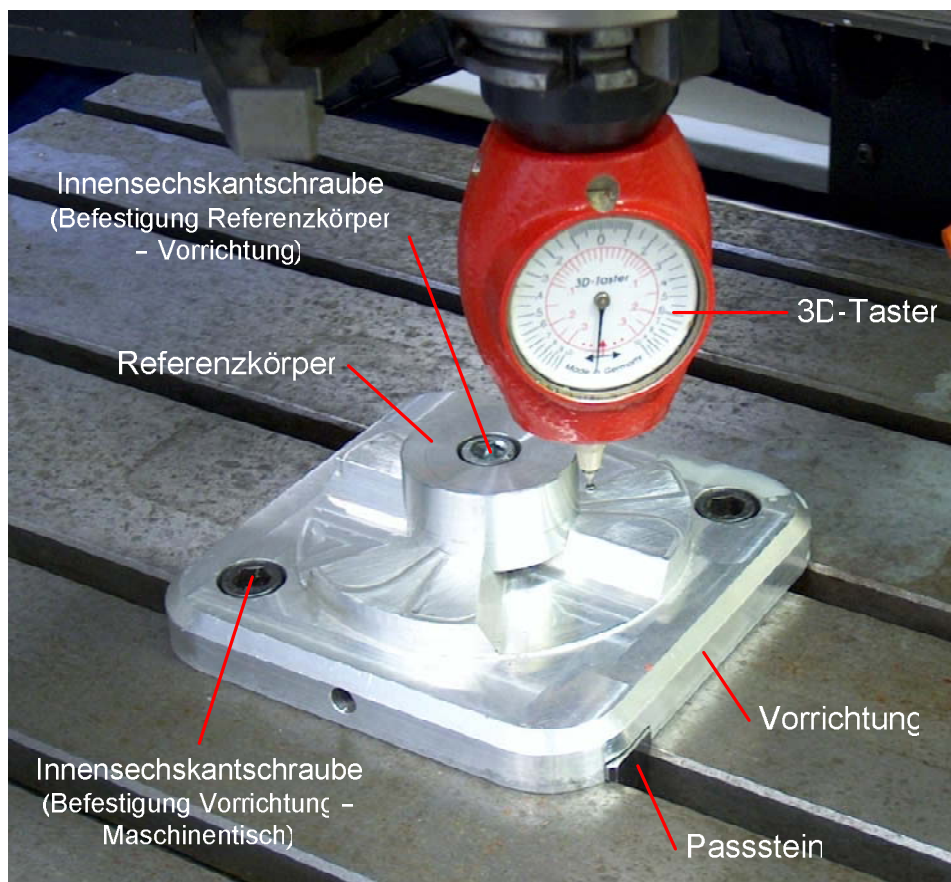


Abbildung 6-24: Einmessen der Vorrichtung zur Aufnahme der Schicht

Im Anschluss an die Positionsbestimmung erfolgt der zweite und letzte Fertigungsschritt zur Herstellung von **Schicht A** (vgl. **Abbildung 6-25**). Diese wird mittels des Exzenter-Spannsystems mit der Vorrichtung verbunden (vgl. Kapitel 5.2.2.3). Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass der Hub des Exzenters voll ausgenutzt wird, um einerseits die maximale Spannkraft und andererseits die Selbsthemmung des Systems zu gewährleisten.

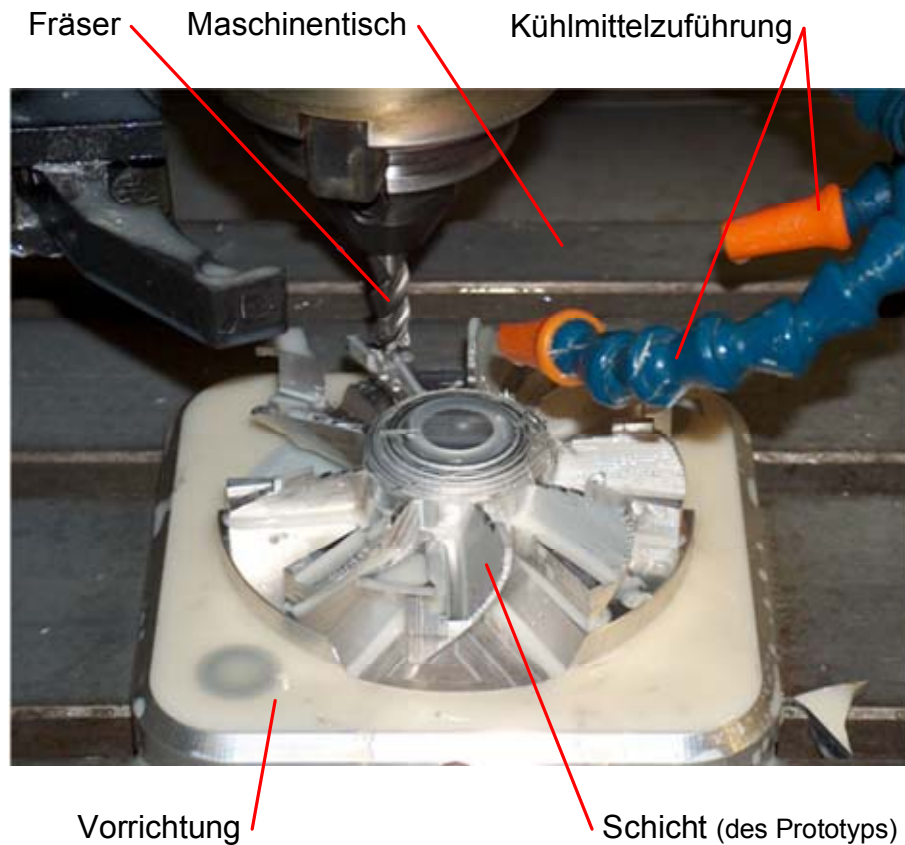


Abbildung 6-25: 2. Fertigungsschritt: Herstellung von Schicht A aus der Richtung der Oberseite

Die **Abbildung 6-26** zeigt die fertig hergestellten Schichten des Probekörpers. Es ist deutlich an der **Schicht B** die Prismen-Verzahnung sowie die Durchgangsbohrung für das kontext-unabhängige Fügen zu erkennen.

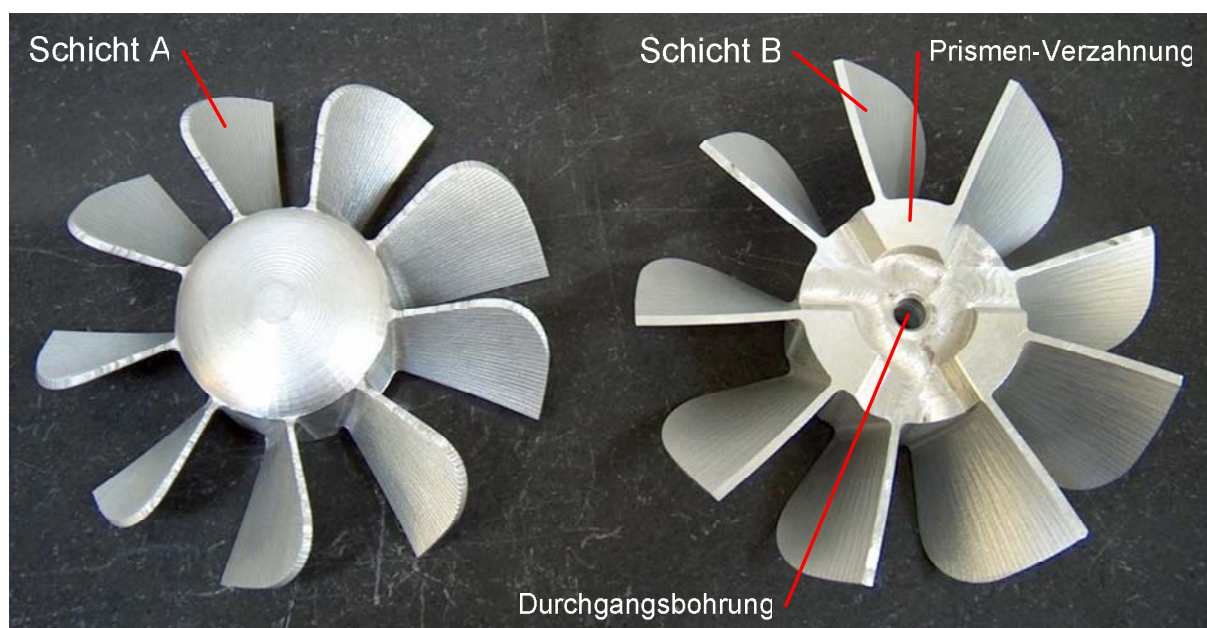


Abbildung 6-26: frästechnisch hergestellte Schichten des Probekörpers mit Prismen-Verzahnung

Zum Fügen werden beide Schichten mittels einer Innensechskantschraube verbunden (vgl. **Abbildung 6-27**). Die Prismen-Verzahnung sorgt neben der Nutzung als Fügetechnik für eine spielfreie Positionierung der Schichten untereinander.

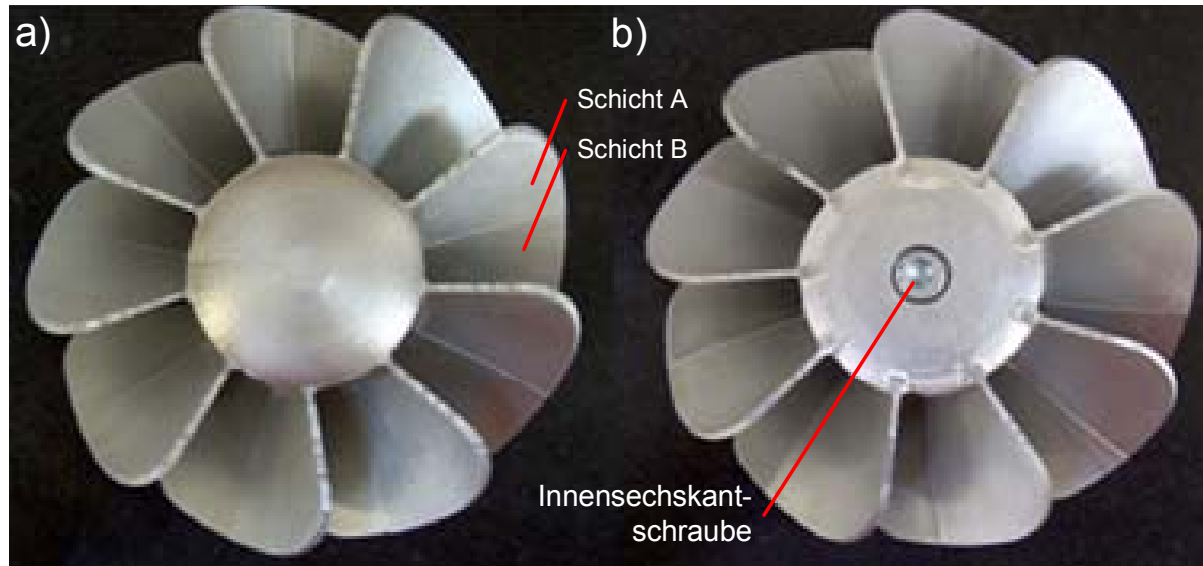


Abbildung 6-27: gefügter Probekörper: a) Draufsicht b) Unteransicht

Charakteristisch für das Fügen mittels der Prismen-Verzahnung ist der dabei entstehende Spalt zwischen den Schichten (vgl. **Abbildung 6-28**). Dieser ist für die Zentriereigenschaft der Fügetechnik (Flankenzentrierung) unerlässlich (vgl. Kapitel 5.2.2.1).

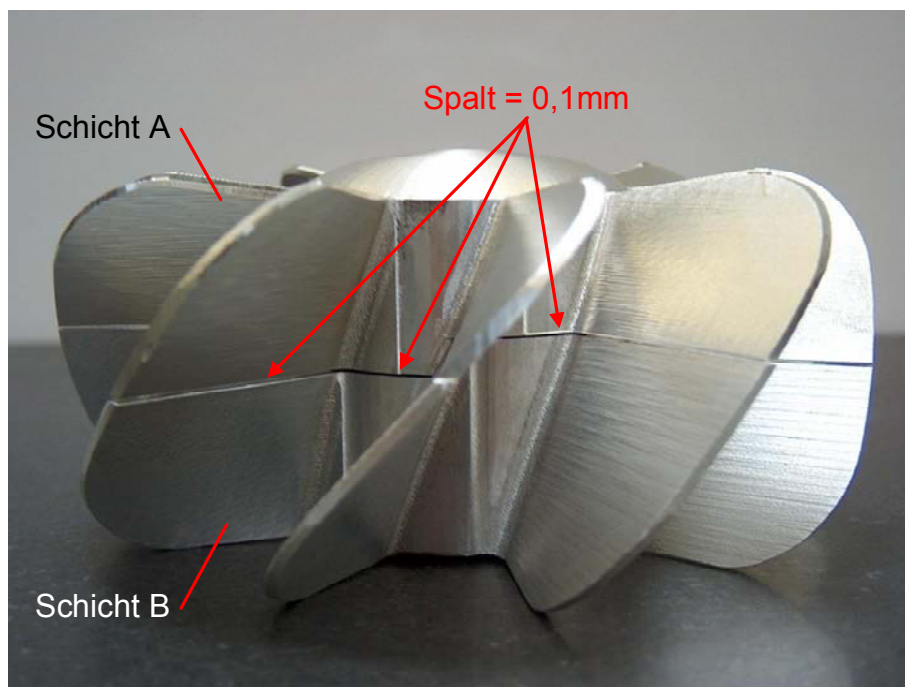


Abbildung 6-28: Prismen-Verzahnung: Fügespalt zwischen den Schichten

Die **Abbildung 6-29** zeigt beispielhaft einen Plandrehvorgang, bei dem die **Schicht B** mit Hilfe der Prismen-Verzahnung zentrisch in eine Drehmaschine aufgenommen wird. Dazu wurde die **Schicht B** mit dem Referenzkörper (vgl. Abbildung 6-24) verbunden und dieser in das Dreibackenfutter eingespannt.

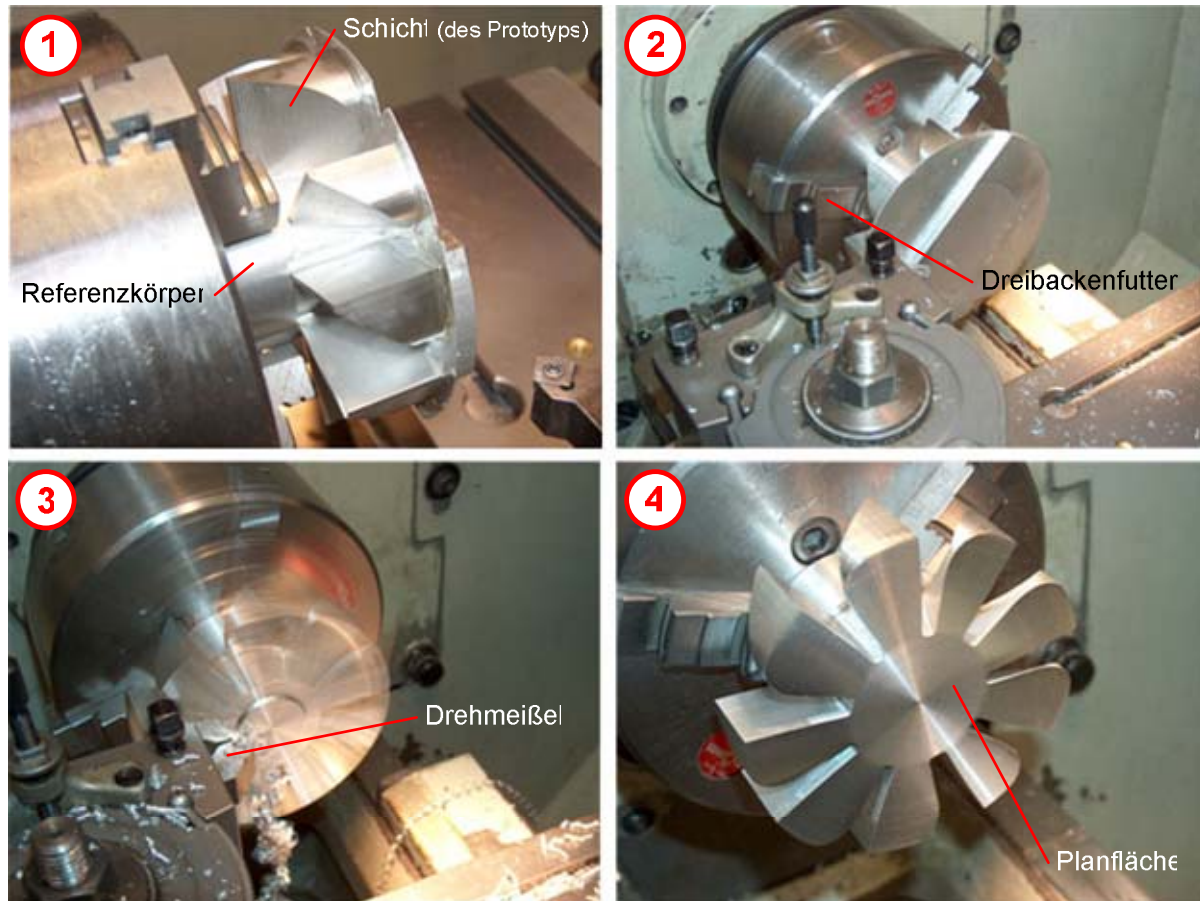


Abbildung 6-29: zentrische Aufnahmen in eine Drehmaschine mittels der Prismen-Verzahnung

Grundsätzlich kann die **Schicht B** im vorliegenden Fall über die äußere Flügelgeometrie aufgenommen werden. Jedoch soll die Abbildung 6-29 zeigen, dass dies unabhängig von der Geometrie des Prototyps über die Prismen-Verzahnung realisiert werden kann. Verdeutlicht wird dieser Umstand anhand der Abbildung 5-37, bei dem das Aufnehmen des Prototyps über das Dreibackenfutter Schwierigkeiten bereitet.

6.3 Beispiel 3: Kurbelwellengeometrie mit Prismen-Verzahnung

Die **Abbildung 6-30** zeigt die Geometrie einer Einzylinderkurbelwelle [31], bestehend aus

- einem Grundzapfen,
- zwei Kurbelwangen,
- einem Hubzapfen und
- einem Grundzapfen mit Passfedernut.

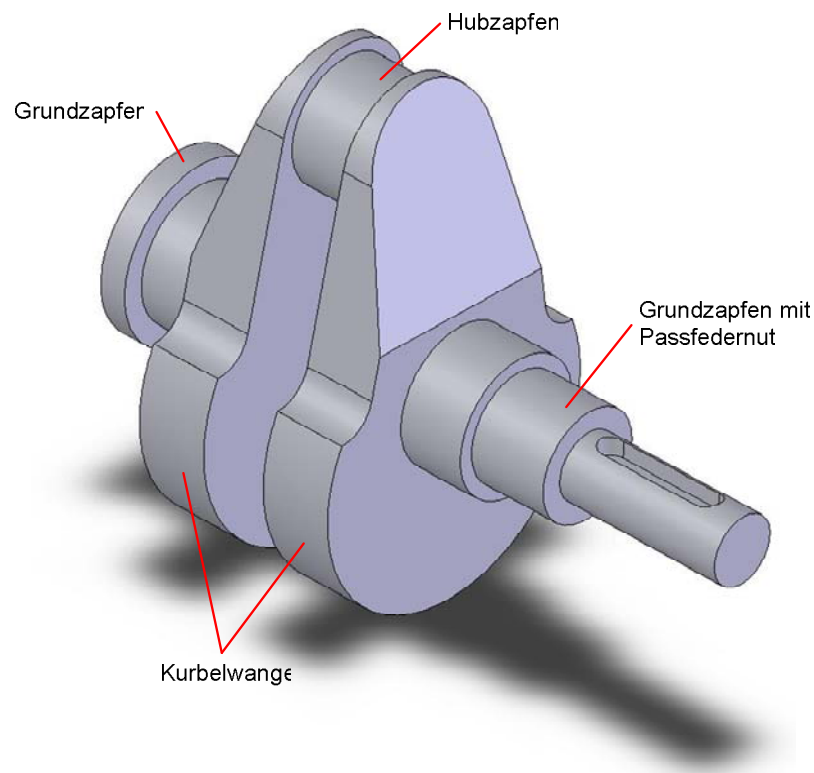


Abbildung 6-30: Einzylinderkurbelwellegeometrie

6.3.1 Datentechnische Ausführung

Für die Herstellung bietet es sich an, die Kurbelwelle segmentweise zu fertigen. Dabei können die rotationssymmetrischen Segmente wie Grundzapfen, Hubzapfen und Grundzapfen mit Passfedernut mittels Drehen oder Fräsen hergestellt werden. Die Kurbelwangen lassen sich dagegen nur mittels Fräsen fertigen.

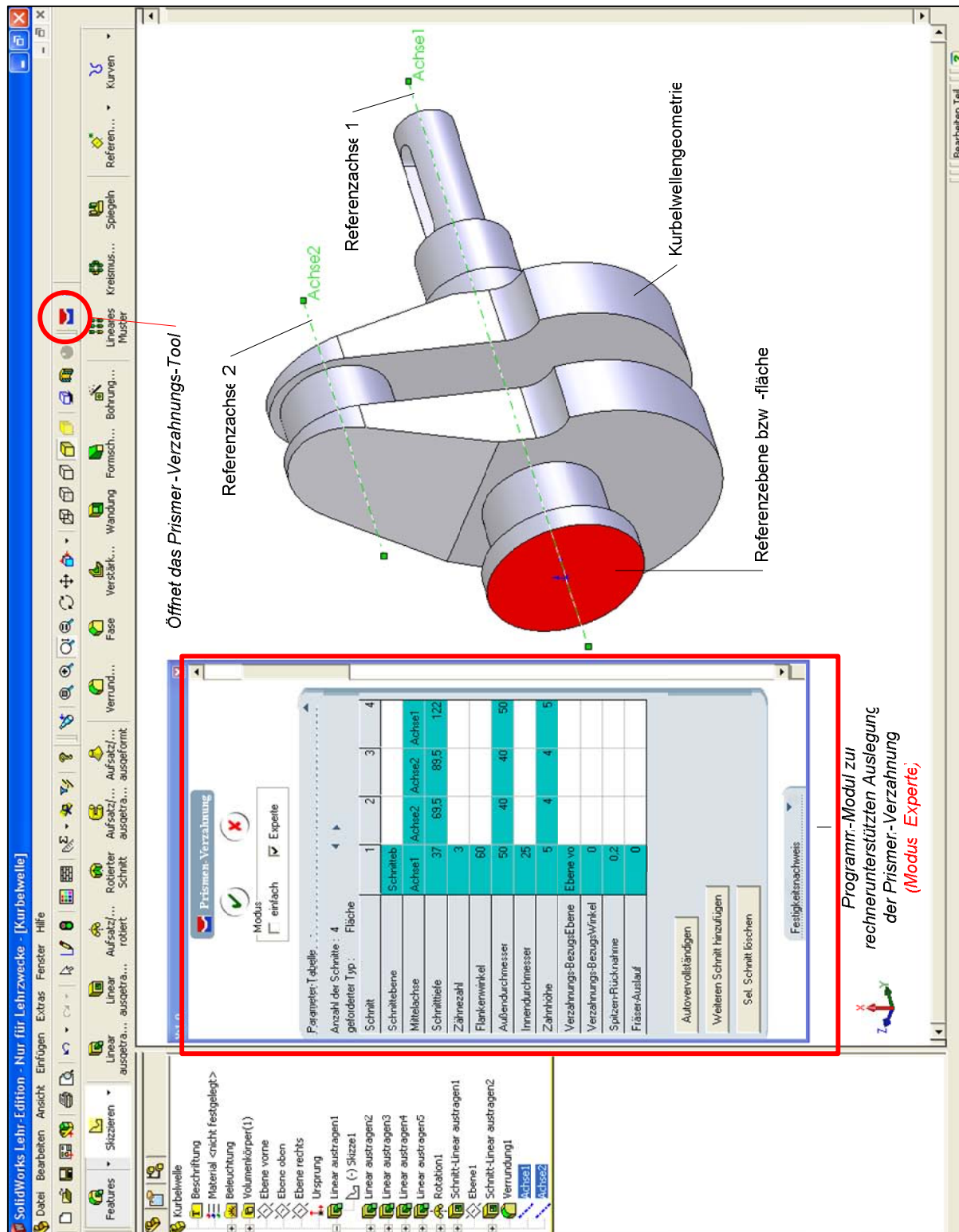


Abbildung 6-32: Anwendungsszenario des Prismen-Verzahnungs-Tools am Beispiel einer Einzylinderkurbelwellengeometrie

Für die Anwendung des Programm-Moduls muss im Vorfeld das CAD-Modell aufbereitet werden. Dazu gehören das Einfügen von zwei Referenzachsen für die Prismen-Verzahnungen sowie das Festlegen der Referenzfläche bzw. -ebene. Das Einfügen von zwei Referenzachsen ist

deswegen erforderlich, da sowohl Prismen-Verzahnungen auf der Achse des Grundzapfens als auch auf der Achse des Hubzapfens vorliegen (vgl. Abbildung 6-32). Als Referenzfläche bzw. -ebene wird die vordere Planfläche des ersten Segmentes (Grundzapfen) gewählt.

Die Eingabe der Geometrie- und Positionsangaben werden im *Experten-Modus* des Programm-Moduls vorgenommen. Dazu wird der Haken im Aktivierungsfeld „*Experte*“ gesetzt (vgl. Abbildung 6-32). Dort werden die Geometrie- und Positionsangaben übersichtlich in tabellarischer Form angezeigt. Über die Funktion „*Weitere Schnitte hinzufügen*“ wird die Anzahl an Schnitten vorgegeben. In dem vorliegenden Fall der Kurbelwelle werden vier Schnitte hinzugefügt, welche durch den Benutzer mit Angaben zu versehen sind. So besitzen die blau hinterlegten Zellen individuelle Angaben zum jeweiligen Schnitt, währenddessen weiß hinterlegte Zellen den vorherigen Ursprungswert in der Zeile übernehmen. Dementsprechend sind beispielsweise der Flankenwinkel und der Innendurchmesser der Prismen-Verzahnung für alle Schnitte gleich (vgl. Abbildung 6-32).

Im Anschluss an die Positions- und Geometrieangaben wird der Festigkeitsnachweis der Prismen-Verzahnung durchgeführt, welcher analog zu Kapitel 6.2 erfolgt. Durch die größeren Rohmaterialabmessungen und die dadurch resultierenden größeren Momente (vgl. Abbildung 6-16) wird anstatt des Exzenter-Spannsystems eine Schraube (M10) verwendet. Dazu ist die vertikale Zugangsbohrung der Vorrichtung (vgl. Abbildung 5-35) mit einem Gewinde zu versehen. Die zu bearbeitende Schicht wird mittels der Schraube von oben mit der Vorrichtung verbunden. Diese Vorgehensweise ist nur bei Schichten mit einer Durchgangsbohrung möglich. Zum Erreichen der erforderlichen Vorspannkraft F_f ist ein definiertes Anzugsmoment für die Schraube erforderlich, welches gemäß der Schraubenauslegung zu bestimmen ist [10][13][14].

Da das Segment 5 (Grundzapfen mit Passfedernut) drehtechnisch hergestellt wird, ist der Festigkeitsnachweis anhand der dort auftretenden Zerspankräfte durchzuführen. Diese sind in gleicher Weise zu ermitteln, wie die Zerspankräfte des Fräsens [27][28]. Durch die Verwendung eines Reitstocks mit Zentrierspitze werden die Belastungen auf die Prismen-Verzahnung reduziert, wodurch größere Zerspankräfte aufgenommen werden können.

Durch betätigen des „*OK-Button*“ (grüner Haken) wird der Teilprozess „Einfügen, Trennen und Speichern“ ausgelöst. Das CAD-Modell wird in fünf Segmente getrennt, welche mit einer Prismen-Verzahnung versehen sind, und anschließend entsprechend der in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Dateistruktur (vgl. Abbildung 5-43) gespeichert.

Die **Abbildung 6-33** zeigt das Ergebnis der datentechnischen Aufbereitung mittels des Prismen-Verzahnungs-Tools. Wie auch in Kapitel 6.2 erfolgt das Einbringen von Gewinde- bzw. Durchgangsbohrungen an den Segmenten unter zu Hilfenahme des Bohrungsassistenten.

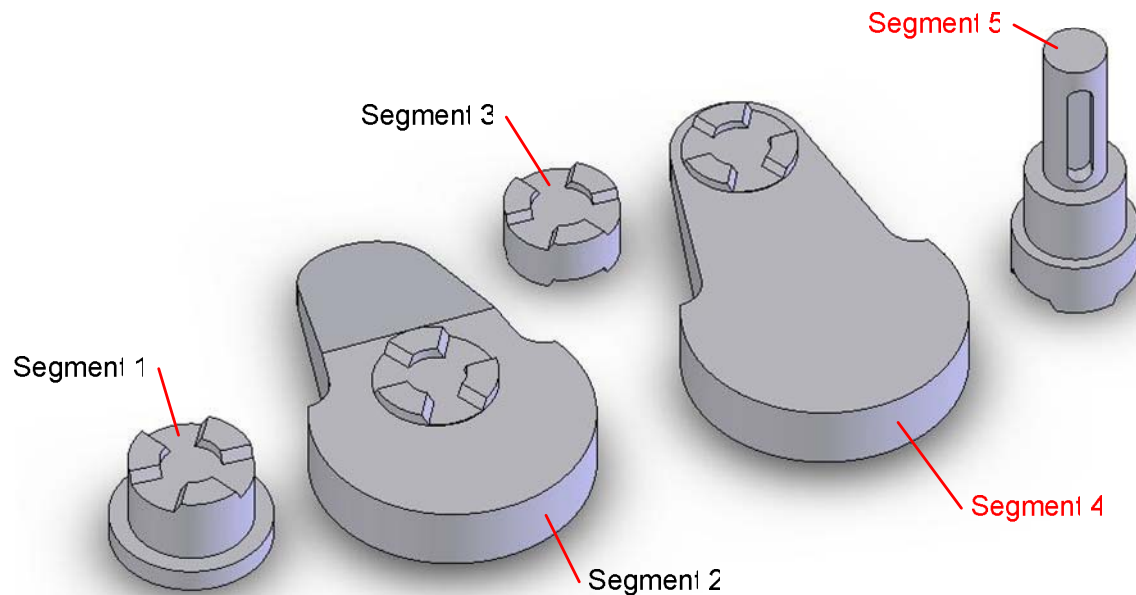


Abbildung 6-33: Ergebnis der datentechnischen Aufbereitung mittels des Prismen-Verzahnungs-Tools

Für die Durchführung der fertigungstechnischen Ausführung werden die NC-Codes für die CNC-Fräsmaschine generiert. Die **Abbildung 6-34** zeigt die Fräswege des ersten Bearbeitungsschrittes von Segment 4 (Kurbelwange). Mit dessen Hilfe ist eine Überprüfung der Frässtrategie sowie der Kollision zwischen Fräser und Werkstück möglich. Auf dem linken Teil der Abbildung sind zudem alle Bearbeitungsschritte aufgeführt, welche zur Herstellung des Segmentes aus einer Bearbeitungsrichtung notwendig sind. Diese bestehen im Wesentlichen aus

- dem Schruppen,
- dem Schlichten,
- dem Zentrierbohren und
- dem Bohren.

Die Bearbeitungsschritte „Zentrierbohren“ und „Bohren“ dienen zur Erzeugung der Durchgangsbohrung. Dabei sorgt das Zentrierbohren dafür, dass der Bohrer beim Erstellen der Durchgangsbohrung nicht verläuft. Die NC-Codes werden nach der Überprüfung auf die Maschinensteuerung der CNC-Fräsmaschine übertragen.

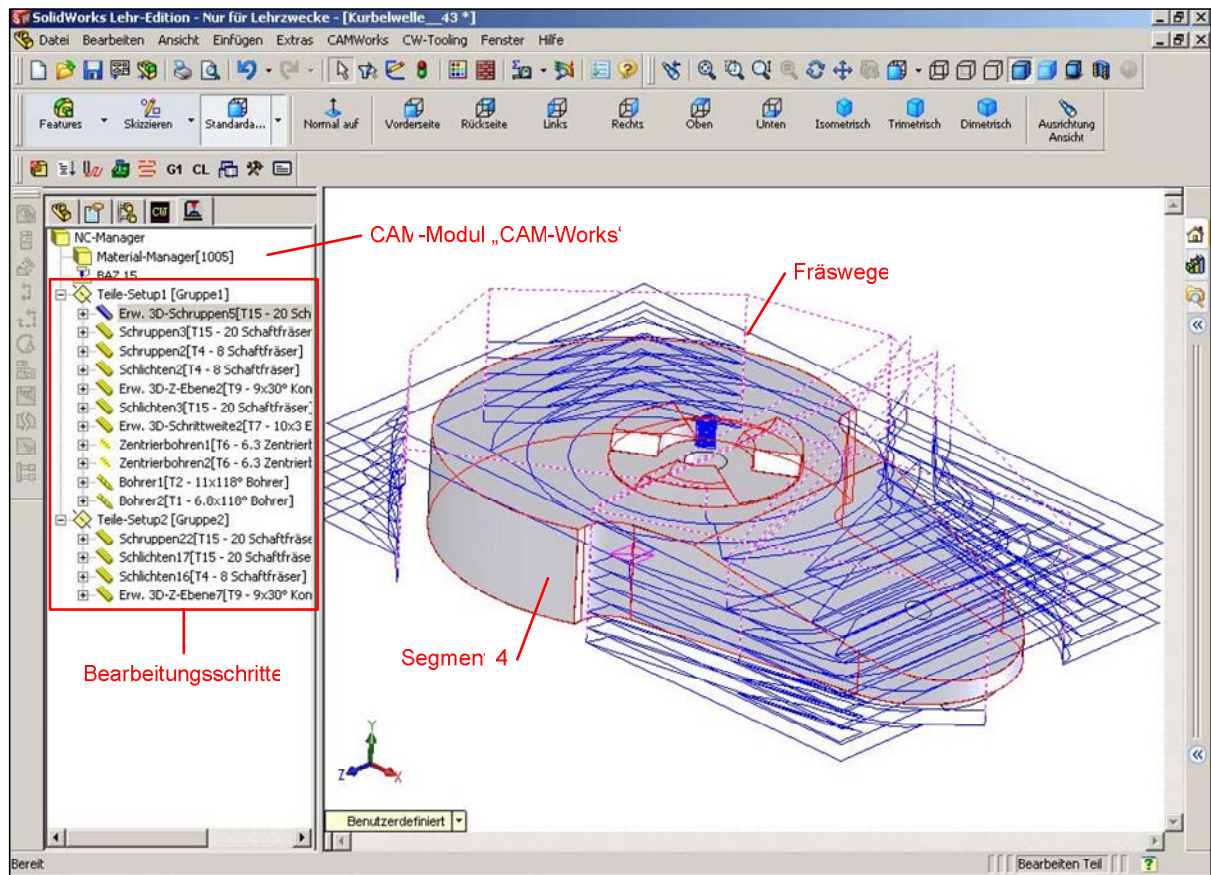


Abbildung 6-34: Erstellen des NC-Codes und Visualisierung der Fräswege mittels CAM-Works

6.3.2 Fertigungstechnische Ausführung

Für die Herstellung des Segmentes 4 (Kurbelwange) wird das Rohmaterial in Plattenform verwendet. Im ersten Fertigungsschritt geschieht die Aufspannung in einem konventionellen Maschinenschraubstock (vgl. Kapitel 2.3.2). Für die Einspannung des Rohmaterials in den Maschinenschraubstock muss ein Übermaß gemäß Kapitel 2.2.3 berücksichtigt werden. Dadurch wird eine umfassende Fertigung aus der ersten Bearbeitungsrichtung sichergestellt, ohne dass das Fräs Werkzeug mit dem Maschinenschraubstock kollidiert. Die **Abbildung 6-35** zeigt zwei Herstellungsstadien des Segmentes 4. Im Endstadium sind deutlich die Prismen-Verzahnung, die Durchgangsbohrung und die Gewindebohrung zu erkennen. Die Durchgangsbohrung wird benötigt für das spätere Fügen mit dem Segment 5 (Grundzapfen mit Passfedernut) und die Gewindebohrung für das Fügen mit dem Segment 3 (Hubzapfen) und Segment 2 (Kurbelwange).

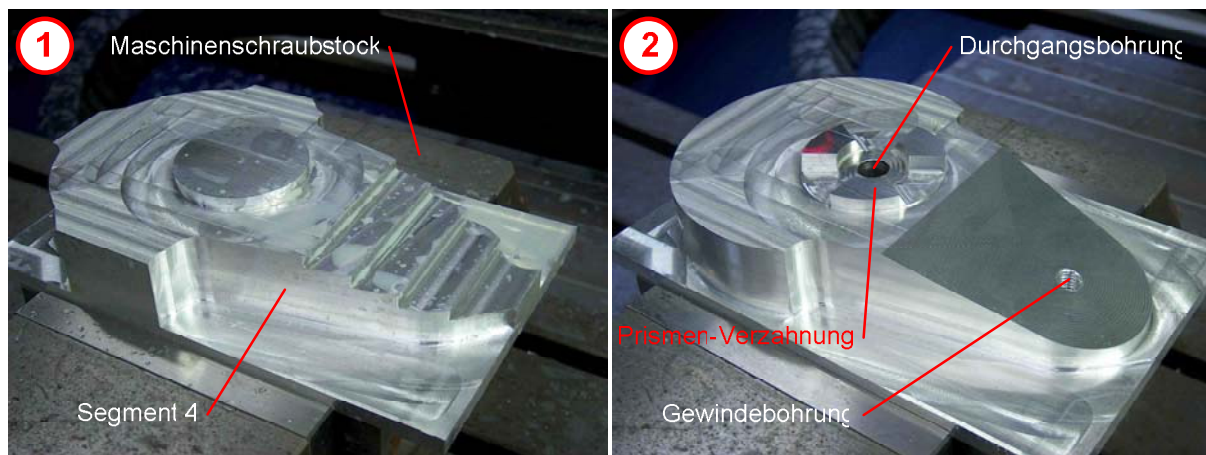


Abbildung 6-35: 1. Fertigungsschritt: Herstellung des Segmentes 4 mittels Fräsen

Nach der Beendigung des ersten Fertigungsschrittes wird das Umspannen des Segmentes und die Bearbeitung aus der Richtung der bisher zum Maschinentisch zugewandten Seite vorgenommen. Das Aufspannen geschieht mittels der Prismenverzahnung und der dafür speziell entwickelten Vorrichtung (vgl. Kapitel 6.2). Demnach ist auch hier eine Positionsbestimmung der Vorrichtung mittels Referenzkörper und 3D-Taster für die CNC-Steuerung der Fräsmaschine erforderlich (vgl. Abbildung 5-36).

Die **Abbildung 6-36** zeigt das Anfangs- und Endstadium des zweiten und letzten Fertigungsschrittes. Im Gegensatz zu dem in Kapitel 6.2 gezeigten komplexen Probekörper (**Schicht A**) besitzt das Segment 4 eine Durchgangsbohrung für die Prismen-Verzahnung. Deshalb ist es möglich, das Segment direkt von oben mit der Vorrichtung zu verschrauben.

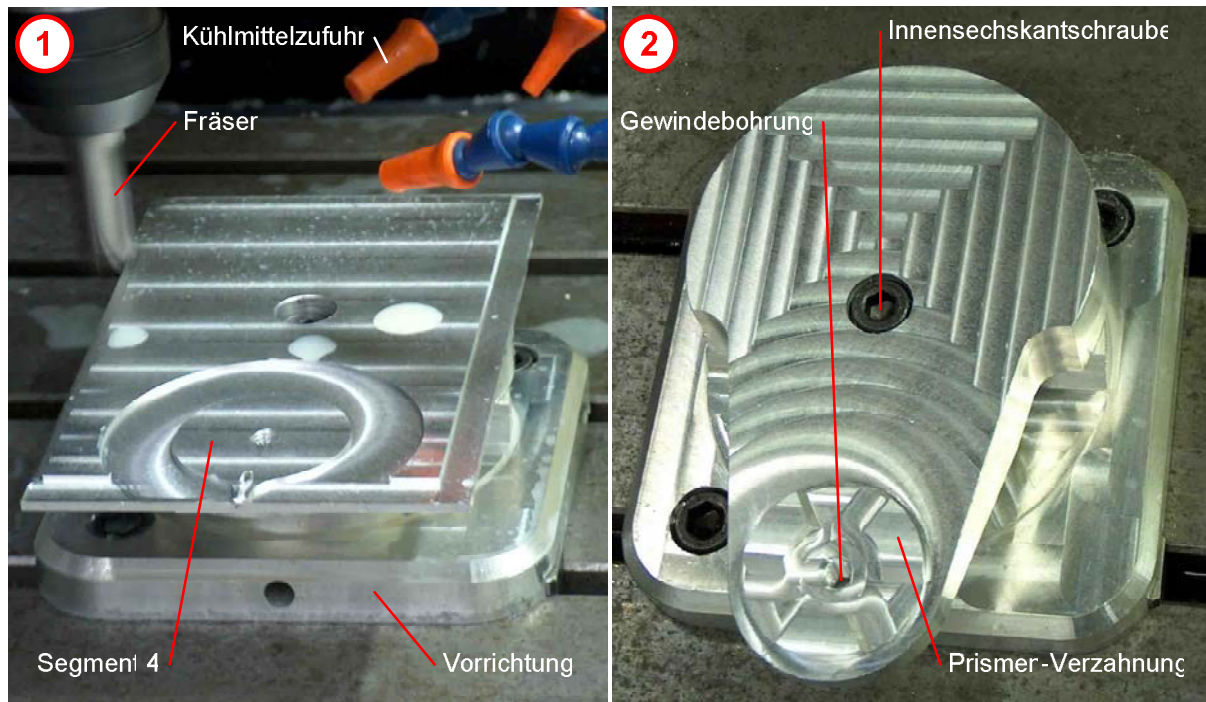


Abbildung 6-36: 2. Fertigungsschritt: Herstellung des Segmentes 4 mittels Fräsen

Die Herstellung von Segment 5 gliedert sich wie Segment 4 in zwei Fertigungsschritte. Im Falle der vorliegenden Geometrie dient der erste Fertigungsschritt lediglich zum Herausarbeiten der Prismen-Verzahnung, welche zur späteren Aufnahme in die Drehmaschine und als Fügetechnik mit Segment 4 dient. Für die Herstellung von Segment 5 wird Rundmaterial verwendet, welches in den Maschinenschraubstock über eine prismatische und eine Standardspannbacke aufgenommen wird (vgl. **Abbildung 6-37**).



Abbildung 6-37: 1. Fertigungsschritt: Herstellung der Prismen-Verzahnung

Die Nutzung einer prismatischen Spannbacke ist erforderlich, um einen sicheren Halt im Maschinenschraubstock zu gewährleisten. Die Abbildung 6-37 zeigt weiterhin die fertiggestellte

Prismen-Verzahnung. Zur dessen frästechnischen Herstellung wurde ein Trapezfräser (Formfräser) verwendet. Der Flankenwinkel des Fräasers von 60° entspricht dabei dem Flankenwinkel der Prismen-Verzahnung. Dadurch kann weitestgehend ein Treppenstufeneffekt verhindert werden, wie er beispielsweise bei der Verwendung eines Schaftfräasers entsteht. Durch diese Maßnahme wird der Flächentraganteil der Zahnflanken positiv beeinflusst.

Im zweiten Fertigungsschritt wird die eigentliche Geometrie von Segment 5 drehtechnisch hergestellt. Dazu wird der bereits aus Kapitel 5.2.2.3 und Kapitel 6.2 bekannte Referenzkörper mit dem Segment verbunden (vgl. **Abbildung 6-38**). Er dient zur Aufspannung in die Drehmaschine bzw. in das Dreibackenfutter.

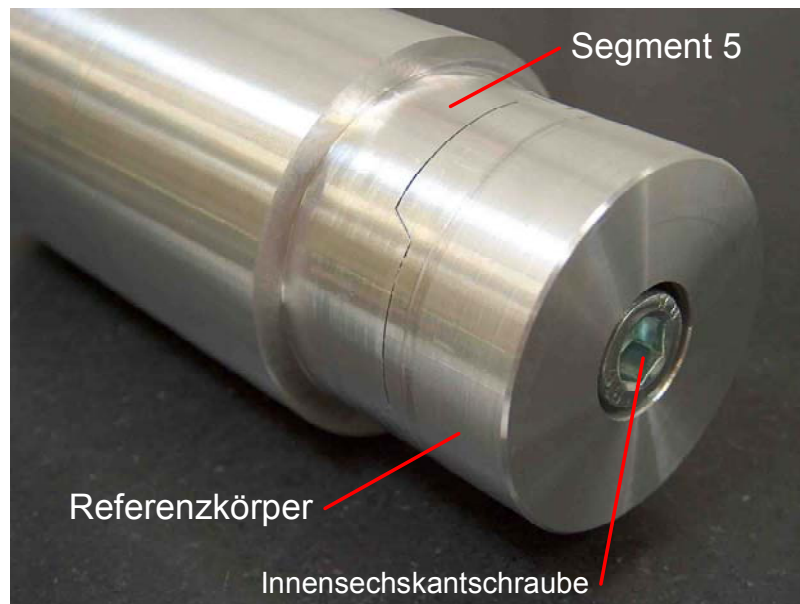


Abbildung 6-38: Referenzkörper für die zentrische Aufnahme in ein Drehnackenfutter

Grundsätzlich kann die Aufnahme von Segment 5 in die Drehmaschine auch ohne den Referenzkörper bzw. die Prismen-Verzahnung realisiert werden. Jedoch bietet das Aufnehmen über die Prismen-Verzahnung wie bei dem Spannen auf dem Maschinentisch der Fräsmaschine den Vorteil der uneingeschränkten Zugänglichkeit des Bearbeitungswerkzeugs zum Werkstück. Damit entfallen zeitintensive Umspann- und Einrichtungsvorgänge des Werkstücks. Im vorliegenden Falle bedeutet dies, dass die gesamte Bearbeitung des Segmentes 5 in einer Aufspannung erfolgen kann.

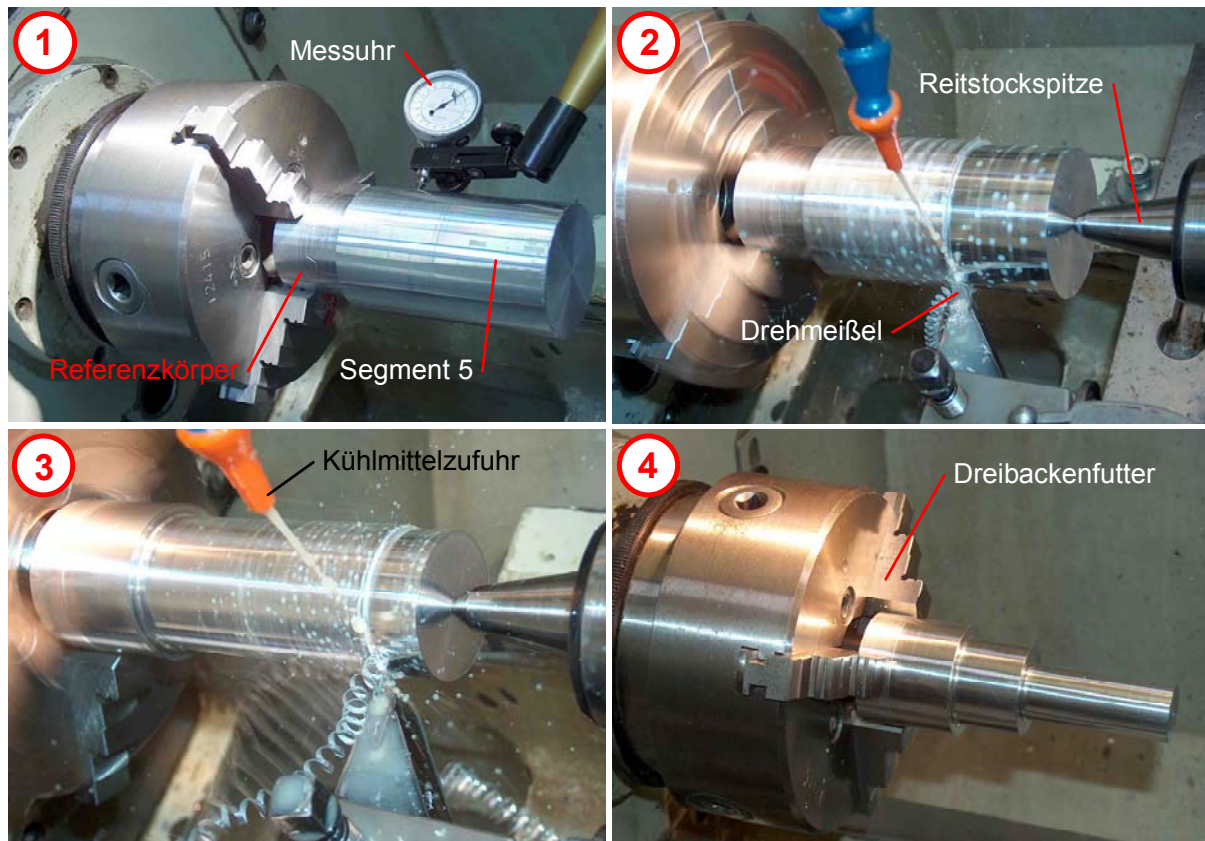


Abbildung 6-39: 2. Fertigungsschritt: Herstellung des Segmentes 5 mittels Drehen

Die **Abbildung 6-39** zeigt die Herstellung von Segment 5 mittels der manuellen Leit- und Zugspindeldrehmaschine *Kirloskar ID 175*800*. Im Sinne einer schnellen und automatisierten Prototypenfertigung sei darauf hingewiesen, dass grundsätzlich die Verwendung von CNC-Bearbeitungsmaschinen angestrebt werden sollte.

Für die Bearbeitung ist es notwendig, das Segment 5 auf der Drehmaschine einzurichten und den Rundlauf mit einer Messuhr zu überprüfen bzw. einzustellen. Im vorliegenden Fall konnte eine Rundlaufgenauigkeit über die gesamte Bearbeitungslänge von 0,040mm erreicht werden. Um diese Rundlaufgenauigkeit während der Bearbeitung beizubehalten, ist diese Position mittels der mitlaufenden Zentrierspitze des Reitstockes zu fixieren. Dazu wird eine Zentrierbohrung in die Stirnfläche des Segmentes eingebracht, welche von der Zentrierspitze aufgenommen wird.

Die **Abbildung 6-40** zeigt das fertig hergestellte Segment 5. Neben der Prismen-Verzahnung und der Gewindebohrung zum Fügen mit Segment 4 ist auch die Passfedernut zu erkennen. Diese wurde nachträglich auf einer Konsolen-Fräsmaschine eingebracht.

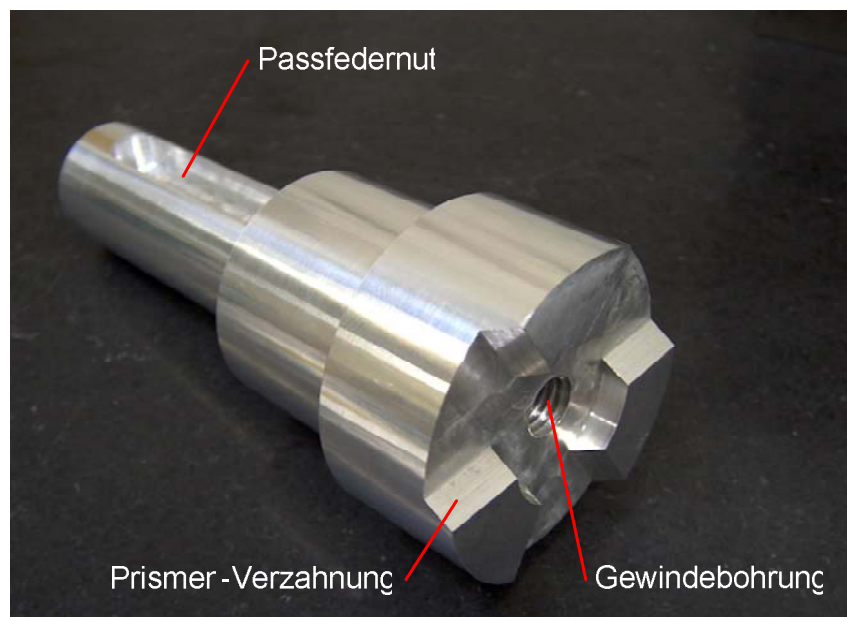


Abbildung 6-40: Fertigteil: Segment 5

Die **Abbildung 6-41** zeigt neben den beschriebenen fertigungstechnischen Ausführungen von Segment 4 und Segment 5 alle weiteren zur Einzylinderkurbelwellengeometrie gehörenden Segmente. Da diese mittels Fräsen hergestellt wurden, kann der Fertigungsprozess analog zu Segment 4 vorgenommen werden.

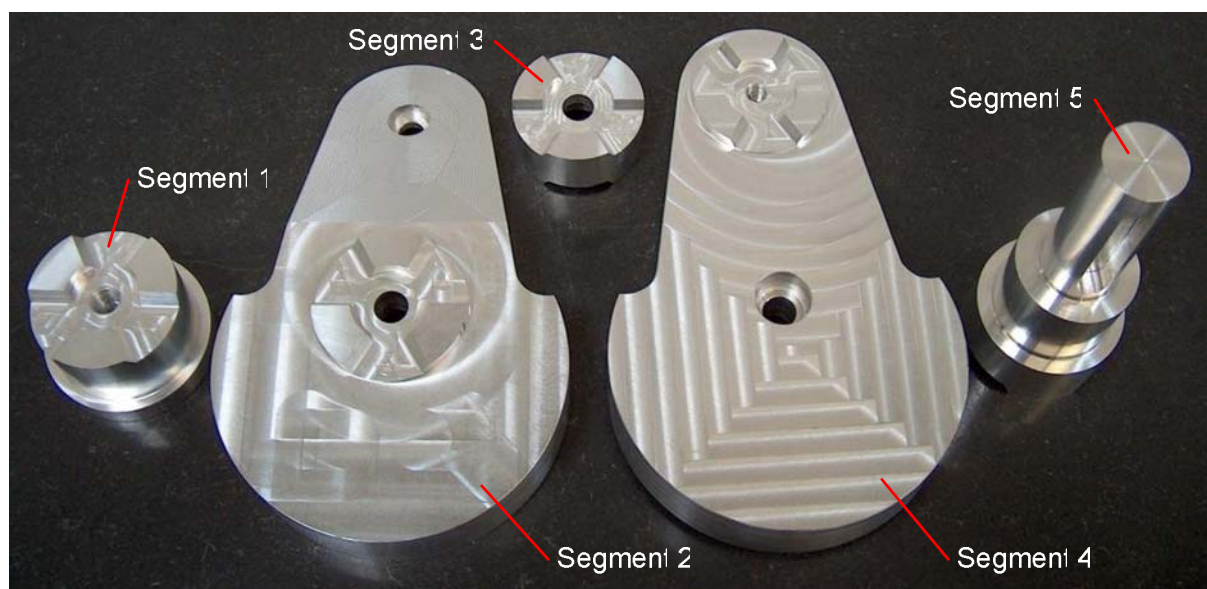


Abbildung 6-41: Segmente 1-5 der Einzylinderkurbelwellengeometrie im Überblick

Die **Abbildung 6-42** zeigt die montierte Einzylinderkurbelwelle. Zu erkennen sind zwei der drei Innensechskantschrauben zum Fügen der einzelnen Segmente.

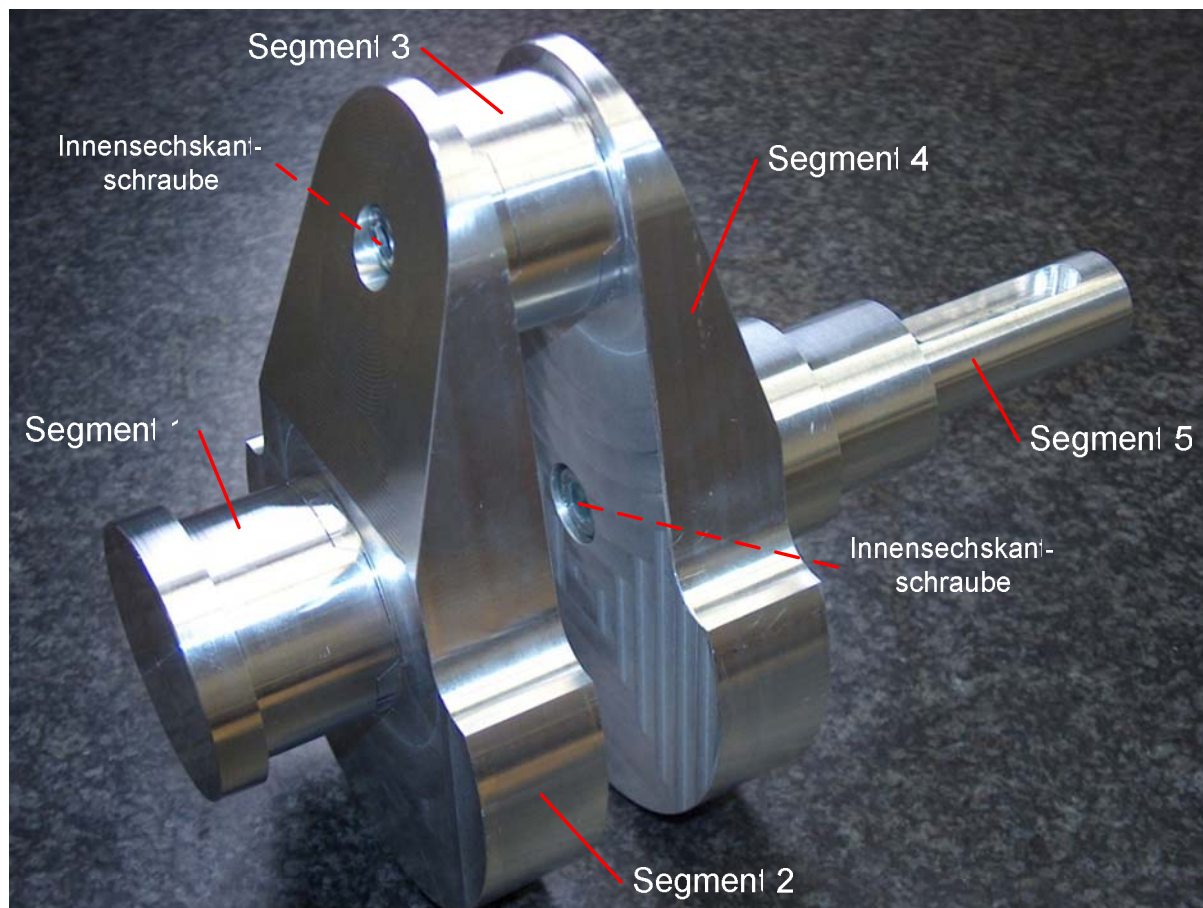


Abbildung 6-42: prototypisch hergestellte Einzylinderkurbelwellengeometrie mittels Drehen und Fräsen

6.4 Genauigkeitsanalyse der Prismen-Verzahnung

Die Zentriereigenschaft der Prismen-Verzahnung wird am Beispiel der in Kapitel 6.3 hergestellten Einzylinderkurbelwelle untersucht. Aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten können sich Lageabweichungen ergeben [32]. Im Folgenden werden daher die Abweichungen bezüglich

- der Konzentrität,
- der Winkelschiefstellungen und
- der Verdrehung ermittelt.

Die Ermittlungen der einzelnen Lageabweichung werden mit der Koordinatenmessmaschine [32] *Olivetti Inspection Mini 23 V* durchgeführt. Diese verfügt über eine Gesamtgenauigkeit von $\pm 3\mu\text{m}$ und über eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 1\mu\text{m}$ [33].

Unter Konzentrität werden beispielsweise Kreise verstanden, die ein und denselben Mittelpunkt besitzen, jedoch unterschiedliche Durchmesser aufweisen. Zur Verdeutlichung sei hier eine Zielscheibe genannt. Analog dazu können auch Quadrate konzentrisch zueinander angeordnet sein. Die **Abbildung 6-43** zeigt den Messaufbau für die Ermittlung der Konzentritätsabweichung der Prismen-Verzahnung, bestehend aus dem Segment 4 (Kurbelwange) und dem Segment 5 (Grundzapfen mit Passfedernut).

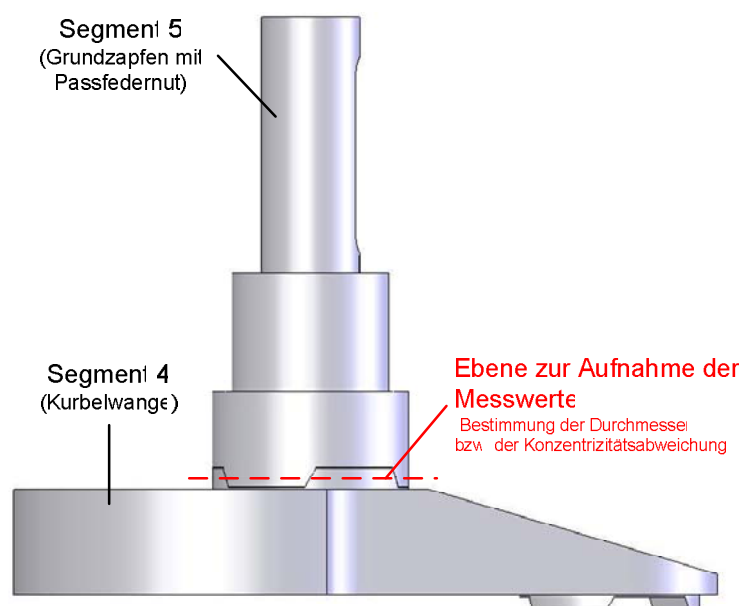


Abbildung 6-43: Bestimmung der Konzentrität

Um den Einfluss anderer Lageabweichungen auf die Konzentrität gering zu halten, werden die Außendurchmesser der Prismen-Verzahnungen beider Segmente in einer gemeinsamen Ebene ermittelt. Durch das Ineinandergreifen der Verzahnungen ist dies im Bereich der Fügestelle möglich und gestattet eine direkte Ermittlung der Konzentritätsabweichung.

Für die Bestimmung der Winkelabweichungen wird messtechnisch die Achse des Grundzapfens mit Passfedernut sowie eine dazu senkrecht stehende Referenzfläche bestimmt. Als Referenzfläche dient die Oberfläche der Kurbelwange (vgl. **Abbildung 6-44**). Die dabei entstehenden Winkelabweichungen können sich in zwei Richtungen ergeben, zum einen in der z-x- und zum anderen in der z-y-Ebene.

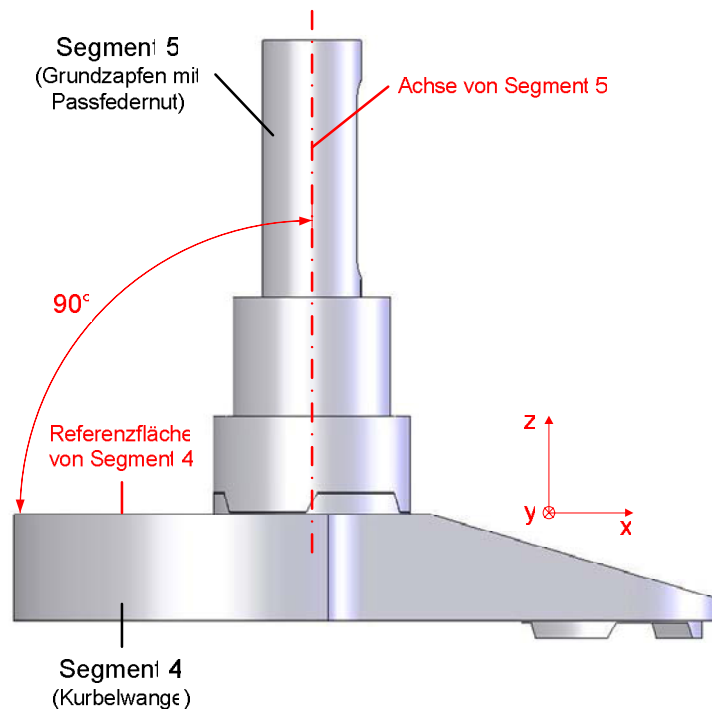


Abbildung 6-44: Bestimmung der Winkelschiefstellungen

Abschließend wird die Verdrehung der Prismen-Verzahnung bestimmt. Dazu werden Segment 2 und Segment 4 (Kurbelwangen), ohne Segment 3 (Hubzapfen), miteinander verbunden. Im Anschluss daran werden an beiden Kurbelwangen die Steigungen der äußeren Kurbelwangenflächen (vgl. **Abbildung 6-45**) in x-Richtung ermittelt und die relative Winkelabweichung zueinander berechnet.

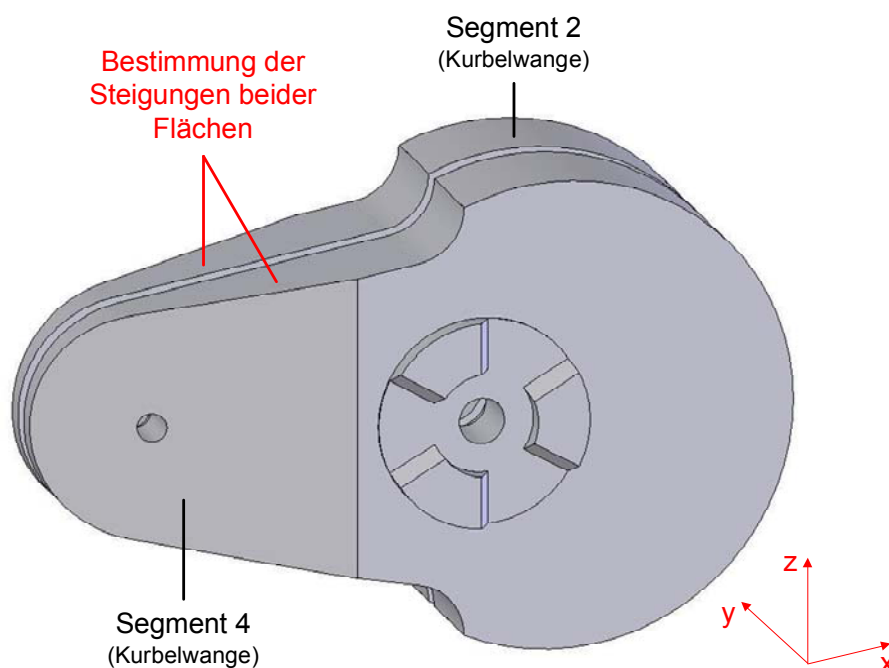


Abbildung 6-45: Bestimmung der Verdrehung

Die **Abbildung 6-46** zeigt die Ergebnisse der einzelnen Lageabweichungen in tabellarischer Form. Die gemittelte Abweichung der Konzentrität von 0,039mm findet sich auch bei dem Einrichtvorgang des Grundzapfens mit Passfedernut auf der Drehmaschine wieder (vgl. Kapitel 6.3). Dort wurde eine Rundlaufgenauigkeit von 0,040mm über die gesamte Länge des Segmentes und somit die Konzentrität bzw. Exzentrizität (Achsversatz) gemessen.

Lageabweichungen	Abweichungen	gemittelte Abweichung
Konzentrität [mm]	0,033 – 0,047	0,039
Winkelschiefstellung (z-x-Ebene) [°]	0,024 – 0,034	0,029
Winkelschiefstellung (z-y-Ebene) [°]	0,015 – 0,029	0,022
Verdrehung [°]	0,351 – 0,359	0,355

Abbildung 6-46: Lageabweichungen der Prismen-Verzahnung

7 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Analyse und Optimierung der Funktionsprototypenherstellung mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid Prototyping Verfahren.

Eine Analyse des gesamten Herstellungsprozesses zeigte bestehende Defizite auf, zum einen bei der Nutzung der Bohrung-Zapfen-Kombination als reversible Füge- und Spanntechnik, zum anderen im Bereich der Automatisierung aufgrund einer fehlenden rechnerunterstützten Auslegung der Füge- und Spanntechnik. Zudem beschränkte sich die Herstellung von Prototypen auf die alleinige Nutzung der Frästechnologie.

Unter Berücksichtigung der Defizite und der daraus resultierenden Anforderungen wurde im Hinblick auf einen verbesserten Herstellungsprozess ein Gesamtkonzept entwickelt und formuliert. Dieses beinhaltet ein speziell für die Prototypenherstellung mittels Fräsen abgestimmtes Fügekonzept sowie ein darauf aufbauendes Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von reversiblen Fügetechniken. Dabei wurde der Grundgedanke, die Fügetechnik auch während des Herstellungsprozesses zum Spannen der Schichten zu verwenden, ohne Einschränkung beibehalten.

Das entwickelte Fügekonzept basiert auf zwei wesentlichen Eigenschaften, dem kontextunabhängigen bzw. –abhängigen Fügen von Prototypen sowie der Analogie zwischen dem Fügen und dem Spannen von Bauteilen auf dem Maschinentisch einer Bearbeitungsmaschine. Ersteres beruht auf der Tatsache, dass Prototypen oftmals ein Teil eines ganzen Systems darstellen und mittels entsprechender Fügetechniken mit diesem verbunden werden. Solche Fügetechniken können daher auch zum Fügen der einzelnen Schichten herangezogen werden. Die zweite Eigenschaft beruht auf der Tatsache, dass das Spannen eines Bauteils auf einem Maschinentisch einen reversiblen Fügevorgang darstellt. Damit können grundsätzlich die Prinzipien und der gesamte Erfahrungsschatz des Vorrichtungsbaus für die Entwicklung von speziellen Fügetechniken, wie sie für den Prototypenbau mittels Fräsen erforderlich sind, herangezogen werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Bohrung-Zapfen-Kombination modifiziert und eine weitere Fügechnik mit Hilfe von Bestimmelementen aus dem Vorrichtungsbau entwickelt. Die grundlegende Idee dieses neuen Fügeverfahrens beruht auf dem Prinzip einer Prismen-Verzahnung. Durch die speziell generierten Eigenschaften dieser Fügechnik ist zudem eine Aufnahme und Bearbeitung in einer Drehmaschine möglich, wodurch neben der frästechnischen Herstellung nun auch das Potenzial der Drehbearbeitung für die Fertigung von Prototypen genutzt werden kann.

Die Entwicklung des Konzeptes zur rechnerunterstützten Auslegung erfolgt am Beispiel der Prismen-Verzahnung. Neben der Bereitstellung des Berechnungsalgorithmus sieht es die Integration in die Benutzeroberfläche eines CAD-Systems vor. Dadurch kann die Auslegung der Fügechnik innerhalb der CAD-Umgebung durchgeführt werden. Weiterhin ermöglicht die Integration die Entwicklung und Implementierung von speziell auf die dreh-fräskompatible Fügechnik abgestimmten Algorithmen, wie sie notwendig sind für das automatische Schneiden des Prototyps und das Hinzufügen der Fügechnik zu den einzelnen Schichten.

Die Gültigkeit des Gesamtkonzeptes wurde abschließend anhand konkreter Beispiele verdeutlicht. Dazu wurde sowohl das entwickelte MLJ-Fügekonzept als auch das darauf aufbauende Konzept zur rechnerunterstützten Auslegung von reversiblen Füge Techniken verifiziert.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Prototypenherstellung auf der Basis des quasi-generativen RP-Verfahrens „Fräsen“ sowohl Defizite, als auch ungenutztes Potenzial aufweist. Unter Berücksichtigung des in dieser Arbeit entwickelten Gesamtkonzeptes lässt sich die Herstellung von Prototypen mittels Fräsen deutlich verbessern. Im Ergebnis konnte der Automatisierungsgrad gesteigert, ein allgemeingültiges MLJ-Füge- und MLJ-Vorrichtungskonzept formuliert und daraus abgeleitet, das Potenzial der Drehbearbeitung für die Herstellung von Prototypen nutzbar gemacht werden.

8 Ausblick

Für mögliche zukünftige Forschungsaktivitäten in diesem Themenbereich bieten folgende Punkte einen Raum:

- Katalogisierung bereits vorhandener Fügetechniken und Entwicklung eines Baukastensystems zum Erstellen von MLJ-Fügetechniken
- Klassifizierung von Prototypen für die Herstellung mittels MLJ
- Nutzung der MLJ-Fügetechniken für generativ hergestellte Prototypen

Die Auswahl einer geeigneten Fügetechnik richtet sich in erster Line an die Anforderungen des zu fügenden Prototyps, welche sehr unterschiedlich sein können. Um die Anzahl an potenziellen Fügetechniken grundsätzlich zu erweitern, sollten bereits vorhandene Fügetechniken auf eine mögliche Tauglichkeit für den Prototypenbau mittels Fräsen hin untersucht und z.B. entsprechend ihrer Eigenschaften katalogisiert werden. Weiterhin ist es sinnvoll zu überprüfen, inwieweit die Entwicklung eines Baukastensystems für die systematische Erstellung von Fügetechniken auf Basis des MLJ-Füge- und MLJ-Vorrichtungskonzeptes möglich ist. Das Baukastensystem könnte dabei aus Bestimm- und Spannelementen und deren Prinzipien bestehen.

Die bereits angesprochenen unterschiedlichen Anforderungen an schichtweise herzustellende Prototypen mittels Fräsen lassen eine Klassifizierung von Prototypen sinnvoll erscheinen. Dadurch ist eine Zuordnung des Prototyps zu einer bestimmten Fügetechnik bzw. zu einer Gruppe von anwendbaren Fügetechniken möglich und wird die Auswahl erleichtern. Im Rahmen eines Vorschlags der NC-Gesellschaft (NCG) werden zwar bereits vier Prototypenarten unterschieden, diese Unterscheidung gibt jedoch im Wesentlichen nur die Art und damit den Anwendungsbereich der Prototypen an, wie beispielsweise Konzeptmodell oder Technischer Prototyp [1]. Für die fräs- bzw. dreh-frästechnische Herstellung von Prototypen sind jedoch darüber hinaus weitere Informationen von Interesse, welche z.B. aus der Geometrie abgeleitet werden können.

Bei der Verdeutlichung der in der Verifizierung hergestellten Prototypen fällt auf, dass beispielsweise bei der Einzylinderkurbelwelle die Verdrehung des Segmentes 1 (Grundzapfen) gegenüber dem Segment 2 (Kurbelwange) völlig irrelevant ist (vgl. Kapitel 6.3.1). Bei dem

komplexen Probekörper dagegen ist die Verdrehung der beiden Schichten zueinander entscheidend und bestimmt über die Güte des Konturübergangs an der Flügelgeometrie. Allein aus dieser Erkenntnis lässt sich eine Klassifizierung für Prototypen ableiten, woraus sich wiederum Eigenschaften für die anwendbare Fügetechnik ergeben.

Ein Vorteil der generativen RP-Verfahren liegt in der Möglichkeit, komplexe Strukturen herstellen zu können. Reicht jedoch der Bauraum der RP-Maschine nicht aus, muss der Prototyp in einzelnen Segmenten hergestellt werden. Diese Segmente müssen, analog zum quasi-generativem RP-Verfahren Fräsen, im Anschluss an die Fertigung gefügt werden. Dadurch können sich die gleichen Anforderungen an die Fügetechnik ergeben wie bei dem Verbinden frästechnisch hergestellter Schichten. Das Einsatzgebiet des MLJ-Fügekzeptes kann daher durchaus auf das Fügen von generativ hergestellten Segmenten übertragen werden. In diesem Zusammenhang ist eine datentechnische Aufbereitung des CAD-Modells notwendig, bei dem die Ansätze zur automatischen Schichtgenerierung, dem Hinzufügen der Fügetechnik zu den Schichten sowie deren Auslegung (vgl. Kapitel 2.2 und Kapitel 5.3) genutzt werden können. Weiterhin kann ein Anwendungsgebiet in der Kombination unterschiedlicher RP-Verfahren zur Herstellung von Prototypen liegen, bei der eine Schnittstelle in Form einer Fügetechnik zum Verbinden der Segmente notwendig ist.

9 Literaturverzeichnis

- | | | | |
|------|----------------------------------|--|--|
| [1] | Gebhardt, A. | Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung | Fachbuch,
2. überarbeitete Auflage,
Carl Hanser Verlag, 2000 |
| [2] | Hastrich, M. | Untersuchung der Einflussparameter bei der Herstellung optisch transparenter Modelle mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid Prototyping-Verfahren | Dissertation,
Universität Duisburg-Essen,
2006 |
| [3] | Lobeck, F. | Konzept zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen einschließlich Simulation und Rapid Prototyping unter Verwendung eines neuen PLM-CAD-Integrationsmoduls | Habilitationsschrift,
Universität Duisburg-Essen,
2004 |
| [4] | Assmann, B. O. | Herstellung hochgenauer Prototypen mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid-Prototyping-Verfahren | Dissertation,
Universität Duisburg-Essen,
2003 |
| [5] | Bergers, D. | Rapid und Virtual Prototyping | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2006 |
| [6] | Fritz, A. H.
Schulze, C. | Fertigungstechnik | Fachbuch,
4. Auflage,
Springer-Verlag, 1998 |
| [7] | Kief, H. B. | NC/CNC – Handbuch 2005/2006 | Handbuch,
Auflage 2005/2006,
Carl Hanser Verlag, 2005 |
| [8] | Alzmetall GmbH | Betriebsanleitung –
BAZ 15 CNC 60.40 | Betriebsanleitung, 2000 |
| [9] | Noack, W | Grundlagen der Programmierung | Handbuch,
3., veränderte Auflage,
Herdt-Verlags, 2001 |
| [10] | Haberhauer, H.
Bodenstein, F. | Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung | Fachbuch,
13. Auflage,
Springer-Verlag, 2005 |

-
- | | | | |
|------|--|---|---|
| [11] | Dumke, R. | Software Engineering | Fachbuch,
3., überarbeitete Auflage,
Vieweg-Verlag, 2001 |
| [12] | VDI - Gesellschaft
Werkstofftechnik | Fügetechniken im Vergleich –
Werkstoff, Konstruktion, Fertigung | Tagung Baden-Baden,
VDI Verlag, 1991 |
| [13] | Muhs, D.
Wittel, H.
Jannasch, D.
Voßiek, J. | Roloff/Matek – Maschinenelemente | Fachbuch,
16., überarbeitete Auflage,
Vieweg-Verlag, 2003 |
| [14] | Sauer, B. | Steinhilper • Röper – Maschinen- und
Konstruktionselemente 2 | Fachbuch,
4. Auflage,
Springer-Verlag, 2000 |
| [15] | Wissussek, D. | Konstruktionslehre IV –
Grundlagen des Methodischen
Konstruierens | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2003 |
| [16] | Mauri, H. | Fertigung und Betrieb –
Vorrichtungen I | Fachbuch,
1., neubearbeitete Auflage,
Springer-Verlag, 1976 |
| [17] | Fronober, M.
Hennig, W.
Thiel, H.
Wiebach, H. | Vorrichtungen – Gestalten, Bemessen,
Bewerten | Fachbuch,
10. Auflage,
Verlag Technik, 1992 |
| [18] | Niemann, G. | Maschinenelemente I | Fachbuch,
2., neubearbeitete Auflage,
Springer-Verlag, 1975 |
| [19] | Hartmann, T. | Entwicklung und Anwendung einer
modifizierten Stirn-Hirth-Verzahnung
für den Einsatz im Prototypenbau | Studienarbeit,
Universität Duisburg-Essen,
2006 |
| [20] | Bunge, T. | Tragfähigkeit von
Plankerbverzahnungen | Dissertation,
Technische Universität
Dresden, 2005 |
| [21] | Stracke, H. J. | CAD II | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2004 |
| [22] | SolidWorks Corp. | SolidWorks 2001 User's Guide | Benutzerhandbuch, 2001 |

-
- | | | | |
|------|--|---|--|
| [23] | Stracke, H. J. | CAE | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2004 |
| [24] | Stracke, H. J. | Betriebsdatenverarbeitung II –
Produktdatenmanagement | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2004 |
| [25] | Heinzler, M.
Kilgus, R.
Näher, F.
Paetzold, H.
Röhler, W.
Schilling, K. | Tabellenbuch Metall – Tabellen,
Formeln, Übersichten, Normen | Tabellenbuch,
40. Auflage,
Verlag Europa-Lehrmittel,
1997 |
| [26] | Hoffmann-Gruppe | Garant– Handbuch Zerspanen | Handbuch,
Ausgabe Kat. 32, 2002 |
| [27] | Tschätsch, H. | Handbuch spanende Formgebung | Fachbuch,
3., Auflage 1991,
Hoppenstedt Verlag, 1988 |
| [28] | Pauksch, E. | Zerspanungstechnik | Fachbuch,
11., Auflage 1996,
Vieweg-Verlag, 1996 |
| [29] | Hirsch, A. | Werkzeugmaschinen - Grundlagen | Lehr- und Übungsbuch,
1. Auflage 2000,
Vieweg-Verlag, 2000 |
| [30] | König, W.
Essel, L. | Spezifische Schnittkraftwerte für die
Zerspanung metallischer Werkstoffe | Tabellenwerk,
Verlag Stahleisen, 1982 |
| [31] | Wissussek, D. | Grundlagen der Kolbenmaschinen | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2003 |
| [32] | Bergers, D. | Mess- und Prüftechnik | Skriptum,
Universität Duisburg-Essen,
2003/2004 |
| [33] | Olivetti GmbH | Inspector Mini Verticale - RQM | Bedienungs- und
Wartungsanleitung,
Ausgabe 1/77 |

LEBENS LAUF

Name	Jens Standke
Geboren	16.09.1974 in Mettmann
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schul Ausbildung

08/1985 - 07/1991	Städtische Realschule, Mettmann
-------------------	---------------------------------

Berufsausbildung

09/1991 - 06/1994	Ausbildung zum Automobilmechaniker bei der Mercedes-Benz AG, Düsseldorf
-------------------	---

Zivildienst

08/1994 - 08/1995	Hausmeistertätigkeit im Caritas-Altenstift, Mettmann
-------------------	--

Schul Ausbildung

08/1995 - 06/1996	Städtische Franz-Jürgens-Kollegschule, Düsseldorf Schulabschluss: Fachhochschulreife
-------------------	---

Studium

08/1996 - 02/2000	Fachhochschule Düsseldorf Maschinenbau mit Studienrichtung Fertigungstechnik Studienabschluss: Dipl.-Ing. (FH)
-------------------	--

02/2000 - 06/2003	Universität Duisburg-Essen Maschinenbau mit Studienrichtung Allgemeiner Maschinenbau Studienabschluss: Dipl.-Ing.
-------------------	---

Nebentätigkeit

10/2005 - 08/2007	Fachhochschule Dortmund, Lehrbeauftragter für CAD
-------------------	---

Berufstätigkeit

07/2003 - 09/2007	Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Duisburg Wissenschaftlicher Mitarbeiter
-------------------	---

10/2007 - heute	Siemens Product Lifecycle Management Software GmbH, Köln Implementation Consultant
-----------------	---